

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК ДО ВИВЧЕННЯ КУРСУ
«ВАКУУМНА ТА ПЛАЗМОВА ЕЛЕКТРОНІКА»
ЧАСТИНА 2
ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРЯДІВ

КИЇВ НТУУ «КПІ»

2015

Методичний посібник до вивчення курсу «вакуумна та плазмова електроніка». Частина 2. Застосування електричних розрядів. Для студентів факультету електроніки НТУУ «КПІ» усіх форм навчання /Шмирьова Л.М., Слободян Н.В. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 92 с.

*Гриф надано Методичною радою факультету електроніки НТУУ «КПІ»
(Протокол №02/16 від 29 лютого 2016 р.)*

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ПОСІБНИК ДО ВИВЧЕННЯ КУРСУ
«ВАКУУМНА ТА ПЛАЗМОВА ЕЛЕКТРОНІКА»
ЧАСТИНА 2
ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРЯДІВ
для студентів факультету електроніки НТУУ «КПІ» усіх форм навчання

Автори: *Шмирьова Людмила Миколіївна, канд. техн. наук., доц.*
Слободян Ніна Вячеславівна, канд. техн. наук.

Відповідальний
редактор: *Л.Д. Писаренко, д-р. техн. наук., проф.*

Рецензент: *Т.Л.Волхова, канд. техн. наук., доц.*

КИЇВ НТУУ «КПІ»

2015

АННОТАЦІЯ

Друга частина методичного посібника з курсу «Вакуумна та плазмова електроніка» присвячена застосуванню електричних розрядів. В першому розділі даються основні відомості про електричний розряд в газі. Другий розділ присвячений розгляду тліючого розряду та його застосуванню в системах відображення інформації. Описані кількісні закономірності та динаміка процесів в тліючому розряді, розглянуті такі прилади, як шкальні дискретні індикатори і панелі зі самоскануванням, які застосовують тліючий розряд у своїй роботі. Наступні розділи присвячені іонно-плазмовим пристроям та обладнанню, плазмовим джерелам електронів, а також плазмовим прискорювачам. Розглянуті принципи роботи, класифікація, будова і конструктивні особливості та області застосування цих приладів. Кожен розділ супроводжується питаннями для самоперевірки. Наприкінці посібника наведений перелік літератури. Даний посібник призначений студентам усіх форм навчання, які вивчають курс «Вакуумна та плазмова електроніка».

Вторая часть методического пособия по курсу «Вакуумная и плазменная электроника» посвящена применению электрических разрядов. В первом разделе даются основные сведения об электрическом разряде в газе. Второй раздел посвящен рассмотрению тлеющего разряда и его применению в системах отображения информации. Описаны количественные закономерности и динамика процессов в тлеющем разряде, рассмотрены такие приборы, как шкальные дискретные индикаторы и панели со самосканированием, которые применяют тлеющий разряд в своей работе. Следующие разделы посвящены ионно-плазменным устройствам и оборудованию, плазменным источникам электронов, а также плазменным ускорителям. Рассмотрены принципы работы, классификация, устройство, конструктивные особенности и области применения этих приборов. Каждый раздел сопровождается вопросами для самопроверки. В конце пособия приведен перечень литературы. Данное пособие предназначено студентам всех форм обучения, изучающих курс «Вакуумная и плазменная электроника».

The second part of the methodical tutorial for the course "Vacuum and plasma electronics" is devoted to the application of electrical discharges. The first section provides basic information about the electrical discharge in the gas. The second section is devoted to the glow discharge and its application in information display systems. The quantitative relationships and the dynamics of the processes in a glow discharge are described, such devices as discrete indicators of scale and panels with self-scanning, which use a glow discharge in their work, are considered. The following sections are dedicated to ion-plasma devices and equipment, plasma electron sources, and plasma accelerators. The principles of operation, classification, design, features and applications of these devices are considered. Each section is accompanied by questions for self-examination. At the end of the book is a list of literature. This manual is intended for students of all forms of training, learning course of "Vacuum and plasma electronics."

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРЯД В ГАЗІ.....	8
2. ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В СИСТЕМАХ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ.....	13
2.1. КІЛЬКІСНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ В КАТОДНІЙ ЧАСТИНІ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ.....	13
2.2. ДИНАМІКА ПРОЦЕСІВ У ТЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ.....	15
2.3. ШКАЛЬНІ ДИСКРЕТНІ ІНДИКАТОРИ.....	18
2.3.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ГАЗОРОЗРЯДНИХ ШКАЛЬНИХ ДИСКРЕТНИХ ІНДИКАТОРІВ (ШДІ).....	18
2.3.2. ШДІ З НЕРОЗДІЛЕНИМИ СИСТЕМАМИ ВІДЛІКУ ТА ІНДИКАЦІЇ ДЕКАТРОННОГО ТИПУ.....	21
2.4. БУДОВА І ПРИНЦИП ДІЇ ПАНЕЛІ ІЗ САМОСКАНУВАННЯМ.....	26
3. ІОННО-ПЛАЗМОВІ ПРИСТРОЇ ТА ОБЛАДНАННЯ.....	34
3.1. ПРОЦЕСИ, ЩО ПРОТІКАЮТЬ В ТВЕРДОМУ ТІЛІ ПРИ ЕЛЕКТРОННОМУ ТА ІОННОМУ БОМБАРДУВАННІ.....	34
3.2. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОПЕРАЦІЇ, ЩО ВИКОНУЮТЬСЯ ЕЛЕКТРОННО- ІОННИМИ МЕТОДАМИ.....	35
3.3. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОННО-ІОННОГО ОБЛАДНАННЯ.....	37
3.4. ПРИНЦИП БУДОВИ ТА ОСНОВНІ ВУЗЛИ ЕЛЕКТРОННО-ІОННИХ УСТАНОВОК.....	39
3.5. ЕМІСІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАЗМИ.....	42
3.6. ДЖЕРЕЛА ІОНІВ.....	46
3.7. ЕЛЕКТРОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ.....	53

4. ПЛАЗМОВІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОНІВ.....	64
4.1. ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОННИХ ДЖЕРЕЛ.....	64
4.2. ДЖЕРЕЛА НА ОСНОВІ ВІДБОРУ ЕЛЕКТРОНІВ З ПЛАЗМИ.....	68
4.3. ЕЛЕКТРОННІ ДЖЕРЕЛА НА ОСНОВІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО РОЗРЯДУ В РОЗРІДЖЕНОМУ ГАЗІ.....	72
4.4. ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСТОСУВАННЯ ПДЕЛ.....	78
5. ПЛАЗМОВІ ПРИСКОРЮВАЧІ.....	81
5.1. КЛАСИФІКАЦІЯ ПРИСКОРЮВАЧІВ ПЛАЗМИ.....	81
5.2. МЕХАНІЗМИ ПРИСКОРЕННЯ ПЛАЗМИ.....	82
5.3. РІЗНОВИДИ ПРИСКОРЮВАЧІВ ПЛАЗМИ.....	85
5.4. ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСКОРЮВАЧІВ ПЛАЗМИ.....	89
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ.....	92

ВСТУП

Представлений методичний посібник є другою частиною посібника з курсу «Вакуумна та плазмова електроніка», вивчення якого ґрунтується на знанні студентами курсів «Фізика», «Фізичні основи електроніки», і ставить своєю метою дати глибше вивчення фізичних явищ і процесів, що лежать в основі роботи іонних приладів і пристроїв, їх застосування та моделювання.

У результаті вивчення курсу, студенти повинні отримати теоретичні знання про фізичні явища, що протікають в газорозрядних середовищах, вивчити фізичні процеси в основних розрядах, таких як дугові самостійний і несамостійний, тліючий розряд та високочастотний, розглянути приклади використання цих розрядів в конкретних приладах, їх застосування, основні характеристики і параметри.

Посібник розглядає питання з вивчення фізичних принципів конструювання плазмових джерел електронів та іонів, їх електрофізичних та вакуумно-технологічних параметрів і розробки спеціального та універсального устаткування для іонно-плазмових процесів.

Актуальність вивчення матеріалу, пов'язаного з новітніми досягненнями в області іонно-плазменної технології, очевидна. Методи фізичної електроніки інтенсивно впроваджуються в технологію та устаткування, що застосовуються при виготовленні напівпровідникових приладів, інтегральних схем, елементів кріогенної техніки, оптоелектроніки, а також інших виробів електронної техніки.

Електронно-іонна технологія заснована на використанні гостросфокусованих електронних і іонних променів для розмірної обробки матеріалу з метою створення геометричного рельєфу мікроелектронної структури, осадження нового матеріалу плівки, зміни властивостей матеріалу.

В останні роки приділяється багато уваги методам отримання потужних електронних пучків за допомогою плазми. В електронних джерелах плазма створюється різними способами і виконує різні функції. Інтерес до плазмових джерел електронів і значний їх розвиток пов'язані з успіхами, досягнутими у фізиці та техніці плазми, і розширенням застосувань електронних пучків.

У методичних вказівках розглядається також розділ, присвячений плазмовому прискорювачу. Плазмові пучки і пучки електронів все більш широко використовуються при виготовленні напівпровідникових приладів, інтегральних схем, у промисловості. Плазмові струмені впроваджені в такі процеси обробки матеріалів, як різання, наплавлення, нанесення покриттів, випаровування, термічна обробка. Перспективною областю застосування є металургія. Тут плазма може знайти застосування для обробки рудної сировини, вилучення металів з руд, плавки металів і сплавів та ін.

1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРЯД В ГАЗІ.

Про зв'язок між основними видами розряду можна судити по повній вольтамперній характеристиці розряду, знятої для діодного газорозрядного проміжку (рис. 1.1). Характеристика побудована в напівлогарифмічному масштабі і відноситься до широкого діапазону струмів від 10^{-12} до 10 А. Окремі її ділянки, позначені римськими цифрами, відповідають різним видам розряду.

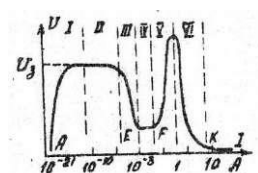


Рис. 1.1. Вольт-амперна характеристика самостійного розряду.

До характерних видів самостійного розряду відносяться темний (область II), тліючий (області IV і V) і дуговий (область VII). Їм передуює несамостійний розряд (область I). Крім сталих форм самостійного розряду, є й перехідні форми (області III і VI).

Початкова ділянка АВ (область I) відноситься до несамостійності розряду. Ділянка ВС відповідає темному (тихому) розряду. Світіння при цьому розряді слабе. Темному розряду відповідає діапазон струмів від 10^{-10} до 10^{-7} А. Слідом за темним розрядом (область II) в приладі виникає перехідна стадія розряду від темного до тліючого у (область III – ділянка СЕ). У тліючому розряді розрізняють дві форми: нормальний тліючий розряд (область IV) і аномальний тліючий розряд (область V).

Нормальному тліючому розряду відповідає горизонтальна ділянка ЕФ. Протяжність цієї ділянки визначається розмірами емітуючої поверхні катода і нормальною щільністю струму. Чим ці величини більше, тим більший струм пропускає прилад в межах нормального тліючого розряду. Напруга, що передуює перехідній до тліючого розряду стадії, приймається за напругу запалювання тліючого розряду.

Ділянка FH , що примикає праворуч до ділянки нормального тліючого розряду, відноситься до аномального тліючого розряду (область V). Він характерний тим, що одночасно зі струмом підвищується напруга горіння розряду.

Дугового розряду, що застосовується у потужних приладах, відповідає ділянка VII. Крім малого падіння напруги (десятки вольт), дуговий розряд характеризується великими густинами струму на катоді (сотні і тисячі ампер на 1 см^2). Такі високі густини струму виникають на невеликій ділянці катода, яка називається катодною плямою і є основою дугового розряду. Катодна пляма є джерелом термо- або автоелектронів.

З огляду на локалізацію катодного світіння і більшої розсіяваної потужності (десятки і більше ват) дугового розряду в індикаторах зазвичай не використовується. Для тліючого розряду характерна наявність великих областей, що рівномірно світяться, а також помірні споживані потужності (частки вата). Тому він широко застосовується в індикаторах.

Фізичні процеси, що мають місце в сталому розряді характеризуються розподілом поля в міжелектродному проміжку, чергуванням шарів світлового випромінювання уздовж його протяжності (рис. 1.2) та розподілом напруженості електричного поля.

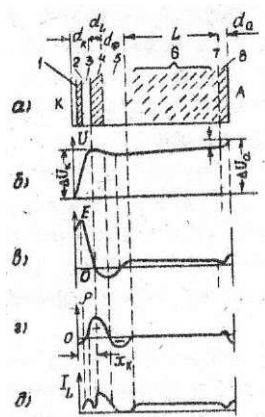


Рис. 1.2. Схема процесів та їх величини, що характеризують в нормальному тліючому розряді: потенціали (б), напруженість поля (в), об'ємний заряд (г), яскравість світіння (д).

За характером зміни кривої розподілу потенціалів нормальний тліючий розряд може бути розбитий на три основні частини 1) катодну d_k , 2) стовп розряду l , 3) анодну область d_a .

За яскравості світіння між катодною частиною та стовпом можуть бути виділені ще два проміжні шари (ділянки d_L та d_ϕ), які пов'язують катодну частину розряду із його стовпом.

Найбільш суттєвою частиною є його катодна частина d_k . Розряд може існувати тільки при наявності його катодної частини.

Це реалізується в короткопроміжкових приладах. Найбільша зміна потенціалу має місце в катодній частині розряду. Рівень підйому потенціалу, який називається катодним падінням напруги ΔU_k , забезпечує необхідну енергію іонів, які приходять з розряду та бомбардують катод, а також енергію електронів, що йдуть від катода в катодну частину розряду та іонізують атоми газу.

На катоді відбувається іонно-електронна емісія. Прискорювані полем електрони набирають спочатку енергію, достатню для збудження і іонізації. Процеси, що відбуваються на шляху руху електронів при їх взаємодії з атомами газу, знаходять відображення в різних яскравостях світіння шарів газу в катодній частині розряду.

Поблизу катода розташовується перша катодна темна область 1, перше катодне світіння, друга катодна темна область 3, на які припадає основна частина падіння напруги. За ними слідує частина, що яскраво світиться – негативне тліюче світіння 4. При тисках, що перевищують 1300 Па, характерних для більшості індикаторних приладів тліючого розряду, область 4 близько розташовується до катода, так що її світіння не дозволяє розрізнити більш слабе світіння області 2. Тоді при аномальному тліючому розряді конфігурація області 4 чітко повторює конфігурацію катода. Після області 4 слідує фарадеевський темний простір 5 і позитивний стовп 6. За анодним кінцем позитивного стовпа іноді слідує ще темний простір 7 і анодне світіння 8.

Перераховані області міжелектродного проміжку в тліючому розряді можна розділити на плазмові області, що характеризуються малою напруженістю поля E і приблизно рівними концентраціями позитивних і негативних зарядів (області 4 – 6), і приелектродні області з високою напруженістю електричного поля і значним просторовим зарядом (області 1 – 3, 7 – 8).

Описані риси тліючого розряду можуть бути пояснені наступним чином. Електрони, емітовані з катода, прискорюються сильним полем катодного темного простору. Але цієї енергії ще недостатньо для збудження атомів газу. Тому відсутні і процеси висвічування. У шарі 2 енергія електронів досягає і перевершує мінімальні рівні збудження. Тому тут мають місце процеси збудження атомів з подальшим їх висвічуванням при нормалізації.

У шарі 3 енергія електронів перевищує рівень, відповідний максимуму ймовірності збудження. Тому інтенсивність збудження і висвічення газу послаблюється. У шарі 4 вже відбувається інтенсивна іонізація газу і з'являється підвищена концентрація іонів і вторинних електронів. Процеси збудження і іонізації супроводжуються яскравим висвічуванням збуджених атомів при переході їх в нормальний стан. Висока яскравість і помітна протяжність шару тліючого світіння є важливою практичною властивістю приладів тліючого розряду, тому що це дозволяє візуально спостерігати за станом приладу при значній віддаленості від місця його спостереження. По мірі збільшення відстані від катода енергія електронів падає, зменшується кількість збуджуючих зіткнень і негативне світіння переходить в фарадеевий темний простір. Підтримання провідності в позитивному стовпі забезпечується тим, що тут в порівнянні з негативним світінням зростає напруженість електричного поля.

Позитивний стовп є плазмової областю з приблизно однаковими концентраціями електронів та іонів. Через більшу рухливість струм в стовпі переноситься в основному електронами, оскільки поле в стовпі набагато менше, ніж в катодному просторі, то іонізація тут в основному визначається безладним, а не спрямованим рухом електронів.

Анодне падіння виникає при великих відстанях між катодом і анодом. Воно прискорює електрони і забезпечує додаткову іонізацію молекул газу. Анодне падіння зникає при зближенні електродів, коли анод потрапляє в область фарадеевого темного простору, де існує надлишок електронів і струм переноситься за рахунок дифузії з області тліючого світіння.

Питання для самоперевірки

1. Перерахуйте основні види розрядів по вольт-амперній характеристиці. Назвіть їх основні відмінності.
2. Чим обумовлене чергування шарів у тліючому розряді?
3. Який вид емісії використовується в тліючому розряді?
4. Від чого залежить напруга горіння в тліючому розряді?
5. Які процеси відбуваються у стовпі розряду?
6. Перерахуйте параметри в катодній області тліючого розряду. Від чого вони залежать?
7. Часові характеристики: поясніть від чого залежить час виникнення розряду, час формування, відновлення електричної міцності проміжку.

2. ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В СИСТЕМАХ

ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

2.1. КІЛЬКІСНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ В КАТОДНІЙ ЧАСТИНІ

НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ

Найбільше значення для розряду має катодна частина. Основними величинами, що характеризують її є катодне падіння напруги ΔU_{kn} , нормальна густина струму на катоді j_{kn} , та протяжність катодної частини розряду $P_0 d_{kn}$.

Для плоскопаралельного проміжку з постійним полем між електродами, що знаходяться на відстані d , рівняння для приросту електронного струму di_e без урахування втрат запишеться:

$$di_e = \eta_i i_e dU, \quad (2.1)$$

де dU – пройдена електронами різниця потенціалів, η_i – коефіцієнт об'ємної іонізації, тобто кількість пар електронів та іонів, створених в результаті іонізації нейтральних атомів одним електроном при проходженні різниці потенціалів 1 В.

Після інтегрування отримаємо:

$$i_{ea} = i_{ek} e^{\eta_i U_{ak}}, \quad (2.2)$$

де i_{ea} – струм електронів, що приходять на анод, i_{ek} – струм електронів, що залишають катод, U_{ak} – різниця потенціалів між катодом і анодом.

Кількість нових електронів, створених за 1 с в результаті іонізації, має дорівнювати різниці кількості електронів, що приходять на анод, і кількості електронів, які покидають катод за цей час

$$i_{ea} - i_{ek} = i_{ek} (e^{\eta_i U_{ak}} - 1), \quad (2.3)$$

Але на кожен новий електрон доводиться також один новий іон, а кожен позитивний іон, що потрапляє на катод, створює електрони. Тоді кількість нових електронів, утворених на катоді, дорівнює:

$$i_{ek} \gamma (e^{\eta_i U_{ak}} - 1), \quad (2.4)$$

Для того щоб струм був сталим, ця величина повинна дорівнювати i_{ek} . Звідси випливає, що:

$$\gamma (e^{\eta_i U_{ak}} - 1) = 1, \quad (2.5)$$

Вираз (2.5) може розглядатися як умова самостійного розряду, напруга виникнення якого

$$U_b = \frac{1}{\eta_i} \ln \left(\frac{1}{\gamma} + 1 \right), \quad (2.6)$$

Падіння напруги на проміжку

$$U_{kn} \sim \frac{1}{\eta_{ef}} \ln \left(\frac{1}{\gamma} + 1 \right), \quad (2.7)$$

де η_{ef} – ефективне значення коефіцієнта в нормальному тліючому розряді з урахуванням неоднорідності поля. Коефіцієнт η_i залежить від наведеної напруженості поля $\frac{E}{P_0}$, яка характеризує енергію, накопичену електроном на шляху середнього вільного пробігу електронів у газі при 0 °С ($\lambda_0 = \frac{1}{P_0}$). Важливою особливістю нормального тліючого розряду є те, що в процесі його формування в катодній частині розряду автоматично встановлюється оптимальне середнє значення наведеної напруженості поля $\left(\frac{E}{P_0} \right)_{opt}$, якому відповідає мінімум питомої напруги іонізації $U_{Nmin} = \frac{1}{\eta_i}$.

Другою основною величиною, що відноситься до катодної частини нормального тліючого розряду, є густина струму. При даних матеріалах катода, роді і тиску газу, що заповнює прилад, густина струму на катоді залишається величиною постійною. Чисельний зв'язок між щільністю струму j_{kn} , падінням напруги U_{kn} і протяжністю катодного частини розряду d_{kn} може бути записаний у вигляді

$$\frac{j_{kn}}{P_0} = K \frac{b_i \left(\frac{E}{P_0} \right)_{opt}^3}{U_{kn}} = j_{k0}, \quad (2.8)$$

де b_i – рухливість іонів, K – коефіцієнт пропорційності.

Третьою характерною величиною в нормальному тліючому розряді є узагальнена протяжність катодної частини розряду $P_0 d_{kn}$. Її можна знайти з рівності

$$P_0 d_{kn} = \frac{U_{kn}}{\left(\frac{E}{P_0} \right)_{opt}}. \quad (2.9)$$

З (2.9) видно, що для даного поєднання катода і газу $P_0 d_{kn}$ зберігає незмінне значення $P_0 d_{kn} = const$.

При обраному тиску газу P_0 значення $P_0 d_{kn}$ дозволяє встановити ту мінімальну відстань між катодом і анодом, при якій в короткопроміжному приладі забезпечується мінімальне значення катодного падіння напруги.

Аналіз формул (2.7) та (2.8) показує, що основні параметри нормального тліючого розряду U_{kn} та j_{kn} повинні сильно залежати від коефіцієнта η_i та γ , які в свою чергу чутливі до газових домішок та поверхневих забруднень.

2.2. ДИНАМІКА ПРОЦЕСІВ У ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

Для роботи індикаторних приладів крім розглянутих вище характеристик на постійному струмі важливе значення мають динамічні характеристики. В зв'язку з цим розглянемо процеси, що відбуваються при розвитку розряду і його припиненні [1, 2].

З моменту прикладення напруги до приладу розрізняють два етапи у розвитку розряду: 1) етап запізнювання t_3 ; 2) етап формування розряду t_f (рис. 2.1). Перший етап враховується від моменту прикладення до приладу напруги до появи у катода першої електронної лавини. Другий етап формування визначається часом наростання анодного струму від початку лавинного розмноження до значення, близького до рівноважного, що визначається умовами розряду і параметрами зовнішнього ланцюга. Після зняття напруги з газорозрядного проміжку також потрібний кінцевий час для повернення його в первісний стан (деіонізації). Він обумовлений необхідністю для іонів і електронів з'єднатися один з одним – рекомбінувати в об'ємі або на обмежуючих проміжок поверхнях. Час, необхідний для зникнення заряджених частинок, називається часом деіонізації.

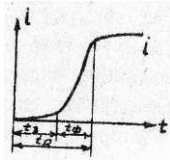


Рис. 2.1. Хід і етапи наростання струму і напруги під час розвитку розряду.

Від часу запізнювання, часу формування та деіонізації залежать частотні властивості приладів.

Розглянемо, від чого залежить час запізнювання виникнення розряду. Через те, що поява першого електрона, який дає початок першій лавині, залежить від ряду факторів: ступеня інтенсивності космічного або радіоактивного випромінювання, умов іонізації атомів газу в об'ємі спочатку первинними, а потім вторинними електронами, від інтенсивності їх зникнення в проміжку, то час запізнювання по відношенню до моменту початку розвитку лавини підкорюється законам статистичної ймовірності. Час запізнювання t_3 тому часто визначають як час статистичного запізнювання. Позначимо ймовірність появи першої електронної лавини при наявності в проміжку тільки одного електрона через W . Тоді середньостатистичне час запізнювання t_3 при наявності в проміжку n_0 електронів запишемо у вигляді рівності

$$t_3 = \frac{1}{Wn_0}. \quad (2.10)$$

Крім перерахованих факторів чисельне значення t_3 залежить також від прикладеної до приладу напруги (напруги понад мінімальний необхідного для запалювання розряду в статичному режимі), так як надмірне напруження визначає ступінь інтенсивності іонізації газу електронами.

Для зменшення t_3 в приладах підвищують початкову концентрацію зарядів (збільшуючи струм несамоствійного розряду), введенням до складу газового наповнення або електродів приладу радіоактивних добавок, опроміненням катода короткохвильовим випромінюванням.

Час формування визначається як час наростання струму від його початкового значення I до повного струму I_a . Етап формування закінчується тоді, коли майже вся прикладена до приладу напруга зосереджується в катодній частині розряду.

Значення часу формування дає рівність:

$$t_f = \frac{\tau_1}{\varepsilon} \ln \left(1 + \varepsilon \frac{I_a}{I_0} \right),$$

де τ_1 – середній час проходження іона від анода до катода, $\frac{I_a}{I_0}$ – відношення струму в анодному ланцюзі приладу до його початкового значення в кінці формування першої лавини, ε – функція, що залежить від E_a , γ . Вона може бути знайдена з наступної рівності

$$\varepsilon = (e^{E_a n_i} - 1),$$

Сумарний час складається з етапів запізнювання t_3 та t_f формування розряду $t = t_3 + t_f$.

Іншою основною характеристикою, що визначає динамічні параметри приладів тліючого розряду, є відновлення електричної міцності проміжку, тобто залежність напруги повторного запалювання від інтервалу часу після припинення розряду. Процес відновлення визначається зникненням заряджених частинок (деіонізацією) в об'ємі і на поверхні. Об'ємні процеси переважають при високих, а поверхневі – при низьких тисках. Поверхневі явища в легких газах відбуваються швидше, ніж у важких

Швидкість відновлення електричної міцності істотно залежить від роду газового наповнення також в чистих газах. Наприклад, гелій та неон мають низьку швидкість відновлення електричної міцності. в аргоні швидкість вище.

Хід кривої відновлення електричної міцності залежить від ряду інших факторів: розмірів міжелектродного проміжку, залишкової напруги на електродах під час деіонізації, початкової концентрації зарядів і т.д. При збільшенні розмірів міжелектродного проміжку ускладнюється поверхнева деіонізація, тому час відновлення ЕП зростає. Якщо залишкова напруга на проміжку в процесі деіонізації лежить в межах 0,2 – 0,8 напруги підтримки розряду, то на дифузійний рух

заряджених частинок до оточуючих поверхонь накладається дрейфовий, і час відновлення зменшується. При збільшенні струму в режимі нормального тліючого розряду для приладів з малою міжелектродною відстанню час відновлення практично не змінюється, а в режимі аномально-тліючого розряду – зростає.

2.3. ШКАЛЬНІ ДИСКРЕТНІ ІНДИКАТОРИ

2.3.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ГАЗОРОЗРЯДНИХ ШКАЛЬНИХ ДИСКРЕТНИХ ІНДИКАТОРІВ (ШДІ)

Шкальні індикатори – найбільш поширений вид вимірювальних і індикаторних засобів. В основному ці прилади реагують на аналогову форму сигналу. До них відносяться ІН-9, ІН-13. До шкальних індикаторів, що реагують на дискретну форму сигналу відносяться газорозрядні індикатори ШДІ ІН-20, ІН-26, ІН-31 [3, 4].

Шкальні дискретні індикатори в загальному вигляді представляють прилади, які містять багато індикаторних елементів, положення яких строго визначене конструкцією (рис. 2.2). Індикаторні елементи можуть мати вигляд штрихів, крапок і т. д. Характер розташування індикаторних елементів визначає форму шкали. Вони можуть розташовуватися по колу, в лінію і т. д. Відстань між сусідніми індикаторними елементами визначена як крок дискретності, а загальна кількість дискретних елементів – як кількість дискретних станів ШДІ. Для простоти опису принципу роботи і синтезу ШДІ представимо окремий газорозрядний проміжок і прилад в цілому у вигляді логічної схеми. Логічна схема газорозрядного проміжку змінюється в залежності від його функціонального навантаження, призначення та конструктивних особливостей.

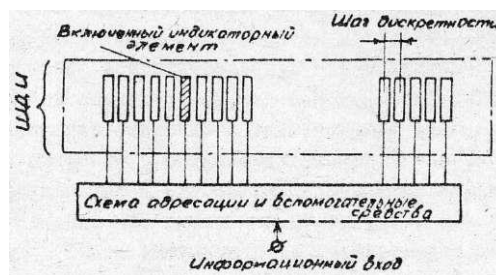


Рис. 2.2. Приклад лінійного розташування індикаторних елементів ШДІ.

Будь-який газорозрядний проміжок може бути запалений подачею напруги вищої, ніж напруга горіння і введенням в проміжок вільних зарядів певної концентрації. У такій комірці вхідним сигналом можна вважати напругу запалювання і заряджені частинки. За вихідний сигнал можна прийняти або випромінювання розряду, або високу концентрацію заряджених частинок (струмова підготовка), яка використовується для забезпечення зв'язку з сусідніми проміжками.

Розглянемо еквівалентну логічну схему (ЕЛС) проміжку приладу з направленим перенесенням розряду (рис.2.3). В ній сигнал 1 на внутрішньому вході забезпечується рухом заряджених частинок від сусіднього палаючого проміжку. Сигнал на зовнішньому вході $VX2$ свідчить про наявність керуючого сигналу. Сигнал на виході – про виникнення випромінювання і високої концентрації заряджених частинок. З малюнка випливає, що тригер буде переходити в стан $Q = 1$ (індикаторний елемент включений) тільки при збігу сигналів на $VX1$ та $VX2$, а в стані $Q = 0$ (індикаторний елемент вимкнений) – при низькому рівні на $VX2$. Через те, що вплив проміжку на сусідній відбувається не відразу після його включення та виключення, в логічну схему між тригером та наступною коміркою введений елемент затримки. Послідовно з'єднані між собою ЕЛС утворюють логічну схему всього приладу з направленим перенесенням розряду. Всі ЕЛС з'єднуються таким чином, що вихід з кожною ЕЛС надходить на $VX1$ двох або однієї з сусідніх ЕЛС.

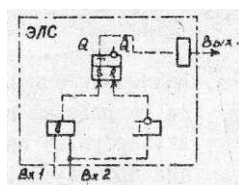


Рис. 2.3. Еквівалентна логічна схема лічильного проміжку приладу з перенесенням розряду.

Розглянемо можливі способи напрямленого перенесення розряду. Для простоти візьмемо три охоплені внутрішніми зв'язками проміжки (рис. 2.4). Анод для всіх проміжків є загальним, катоди роздільні. Така структура називається багатокатодною системою. У багатоанодній системі електродів загальним є катод, а роздільними, такими, що переносять, електродами є аноди.

Перенесення розряду відбувається наступним чином. Припустимо, що розряд горить а проміжку $A-K_i$. Заряджені частинки з нього проникають в проміжки $A-K_{i-1}$ та $A-K_{i+1}$. Цим забезпечується рівень сигналу 1 на $VX1$, що призводить до зниження напруги запалювання. При подачі сигналу 1 на $VX2$ проміжку $A-K_{i-1}$, він запалюється, оскільки за двома входам збігаються рівні 1. Проміжок $A-K_{i+1}$ не запалюється у зв'язку з тим, що на його вході $VX2$ низький рівень. Таким чином розряд переміщається від проміжку $A-K_i$ до $A-K_{i+1}$.

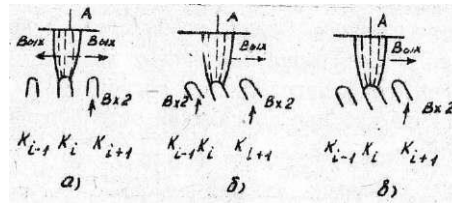


Рис. 2.4. Можливі способи перенесення розряду а) сигнали по $VX1$ проходять на два сусідніх проміжки, б) сигнал по $VX1$ проходить на один сусідній проміжок, сигнали по $VX2$ подаються на обидва, в) сигнал по $VX1$ проходить на один сусідній проміжок.

Багатокатодна система електродів залежно від форми катода може мати симетричні або напрямлені катоди. У першому випадку вихідний сигнал подається на обидва сусідніх проміжки. У другому випадку, завдяки спеціальній формі електродів, лише на один. Звідси впливають такі можливі випадки напрямленого перенесення розряду на проміжки, сусідні з включеним.

– При симетричних катодах сигнал з виходу палаючого проміжку надходить на $VX1$ обох сусідніх проміжків. Тому для забезпечення напрямленого перенесення розряду слід подавати сигнал на $VX2$ тільки одного з сусідніх проміжків (рис. 2.4 а).

– При напрямлених катодах сигнал з виходу надходить на вхід $VX1$ тільки одного з сусідніх проміжків. Тоді для забезпечення напрямленого перенесення розряду можна подавати сигнал на $VX2$ або обох сусідніх проміжків (рис. 2.4 б), або тільки одного (рис. 2.4 в).

– При симетричних катодах напрям перенесення можна міняти, тобто можливий реверс зсуву. Це забезпечується тим, що внутрішні сигнали надходять

відразу на два сусідні з палаючим проміжки. При несиметричних катодах реверс неможливий, оскільки внутрішній сигнал надходить тільки на один сусідній проміжок, розташований в даному випадку справа (рис. 2.4 б).

Завдяки зазначеним властивостям газорозрядного проміжку ШДІ мають широкі функціональні можливості і в даний час класифікуються за такими основними ознаками:

- ШДІ з нерозділеними системами відліку та індикації. Вони призначені для випадків, коли оператор повинен бачити не тільки результат вимірювання, але і його динаміку.

- ШДІ з розділеними системами відліку та індикації з оперативною пам'яттю. Призначені в основному для випадків, коли оператору потрібні остаточні відомості інформації.

2.3.2. ШДІ З НЕРОЗДІЛЕНИМИ СИСТЕМАМИ ВІДЛІКУ ТА ІНДИКАЦІЇ ДЕКАТРОННОГО ТИПУ

До цієї групи приладів відносяться лічильно-індикаторні декатрони. Існує достатня кількість різних типів декатронів, що відрізняються конструктивними і функціональними ознаками, електричними і світлотехнічними параметрами.

Незважаючи на відмінності всі декатрони мають однакову конструктивну схему:

- вони містять загальний електрод, навколо якого розташована система електродів для перенесення розряду,

- декатрони мають відкриту діодну конструкцію, тобто газовий проміжок в них між різнополярними електродами являє собою вільний простір.

Найбільш поширеним є двохімпульсний багатокатодний декатрон з круглою шкалою.

Фрагмент логічної схеми двохімпульсного декатрона показаний на рис. 2.5. У неї входять ЕЛС, комірка АБО-НІ. ЕЛС з номерами 2 та 5 відносяться до індикаторних проміжків, а 1, 3 та 4 – до підкатодних та виконують допоміжні функції. Напрявлене перенесення розряду в такій схемі відбувається наступним

чином. Припустимо, що включена комірка 2 (ЕЛС2). Це означає, що на шині А рівень сигналу відповідає 1, а на шинах Б і В – 0. ЕЛС2 має дві внутрішні зв'язки з ЕЛС1 та з ЕЛС3, по яких надходять сигнали 1.

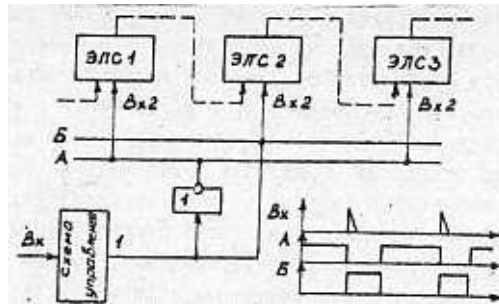


Рис. 2.5. Логічна схема двухімпульсного декатрона з симетричними катодами.

Якщо з приходом лічильного імпульсу на схему управління декатрону з'явиться сигнал 1, він надійде на ЕЛС3 та не передаватиметься на ЕЛС1. В результаті на ЕЛС3 сигнал 1 буде присутній на двох входах і комірка ЕЛС3 включиться. Поява сигналу 1 на шині Б знімає його на шині А (через комірку АБО-НІ).

З внутрішнього виходу ЕЛС3 сигнал 1 буде надходити на ЕЛС2 та ЕЛС4. Схема управління видає сигнал 1 обмеженої тривалості на шину Б. По закінченню імпульсу на шині Б сигнал відразу з'являється на шині В, а отже, на ЕЛС4, ЕЛС1 і т. д. На ЕЛС4 сигнал присутній на двох входах, на ЕЛС1 – на одному, тому включається ЕЛС4 і вимикається ЕЛС3. Тривалість імпульсу на ЕЛС4 також обмежена. Тому після припинення імпульсу на шині В на шині А з'явиться сигнал 1. Сигнал 1 буде надходити на всі індикаторні комірки. Однак тільки в ЕЛС5 сигнали 1 збігаються за двома входами, тому включається ЕЛС5, а згасне ЕЛС4. Таким чином, відбувається спрямоване переміщення включеного стану комірок. Комірки 2 та 5 можуть перебувати у включеному стані скільки завгодно довго, тобто відбувається запам'ятовування включеного стану. Тому всі денатрони відносяться до приладів з вбудованою оперативною пам'яттю.

Конструкція приладу, виконана на основі даної логічної схеми, показана на рис. 2.6 а, а схема включення – на рис. 2.6 б. Електродна система містить нікелевий дисковий анод і три катода, кожний з катодів являє собою групи по 10 паралельних

штирків. Всього катодів 30. Крім індикаторних катодів є дві групи підкатодів 1ПК та 2ПК. Наявність двох підкатодів в кожній групі двохімпульсного декатрона диктується необхідністю забезпечення спрямованості перенесення розряду по електродам приладу. Потрібна напрямленість забезпечується схемою управління.

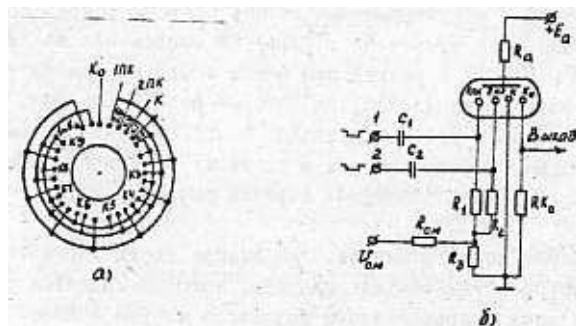


Рис. 2.6. Принципова схема розташування та з'єднання електродів двохімпульсного декатрона і схема включення.

Заповнюється прилад сумішню гелію з неоном або гелію з воднем. Рід наповнення визначається необхідною швидкістю відліку та терміном служби приладу за умови отримання достатньо високої яскравості світлової плями на шкалі приладу. При включенні напруги живлення E_a між анодом і одним з індикаторних катодів, наприклад, K_4 запалюється розряд. Напруга між анодом і катодом зменшується до напруги горіння тліючого розряду. Заряджені частинки, метастабільні атоми, фотони з розрядного проміжку $A-K_4$ проникають в сусідні проміжки і знижують їх напругу запалювання.

Кількість заряджених частинок, що проникають в проміжок анод-катод, зменшується з відстанню. Тому віддалені проміжки менш підготовлених, ніж сусідні з палаючим. У зв'язку з цим їх напруга запалювання вище. На катоди подане позитивне зміщення 30 – 40 В. Тому розряд на підкатодах виникнути не може.

Імпульс, що підлягає відліку, надходить на схему керування, яка виробляє два послідовних негативних імпульси, амплітуда яких більше напруги зсуву. Перший з них подається на підкатод 1ПК і його потенціал стає таким, що є можливим виникнення розряду між анодом А і підкатодом 1ПК. Але з усіх штирків підкатода переважні умови має штирок 4', через те, він оточений іонізованим газом. Тому

розряд переноситься зі штирка 4 на штирок 4'. Горіти одночасно на два сусідніх катода (4 та 4') розряд при загальному аноді не може, тому при зниженні потенціалу катода, на який перейшов розряд, знижується одночасно і потенціал анода. А це призводить до того, що різниця потенціалів між анодом і катодом, з якого пішов розряд, стає менше напруги горіння розряду. Катод 4 перестає горіти.

По закінченню першого імпульсу на виході схеми управління утворюється другий негативний імпульс, який подається на підкатод 2ПК. З усіх штирків цього підкатода штирок 4 має переважні умови виникнення розряду, оскільки він оточений іонізованим газом.

Таким чином, розряд зі штирка 4' підкатода 1ПК перекинеться на штирок 4'' підкатода 2ПК. По закінченні другого імпульсу виникають початкові умови, але тепер в переважному стані знаходиться штирок 5.

Таким чином, дія вхідного сигналу, що підлягає відліку, через схему керування перевела стан горіння штирка 4 у стан 5 індикаторного катода. Розряд затримується на індикаторному катоді ІК до приходу наступного відлікового імпульсу, як завгодно довго, поки подається живлення (режим стояння розряду). Практично цей час обмежений через катодне розпилення. У групі індикаторних катодів є нульовий штирок K_0 , який знаходиться під потенціалом катода ІК без безпосереднього контакту з ним. При скиданні горіння переходить на нульовий штирок. Після проходження кожних 10 імпульсів штирок 0 загоряється знову. З приходом розряду на опорі навантаження в його ланцюзі з'являється вихідний імпульс. Таким чином, декатрон є перерахунковим пристроєм з коефіцієнтом ділення 10. При зміні послідовності імпульсів, що вводяться в групі підкатодів, а саме, при введенні спочатку імпульсу на підкатод 2ІК, а потім 1ПК можна змінити напрям перенесення розряду на протилежний. Таким шляхом можна здійснити реверс рахунку. Описаний декатрон вельми простий по конструкції, однак вимагає для управління двох зсунутих по фазі імпульсів, що робить схему управління порівняно складною. Для спрощення схеми управління були розроблені декатрони з одноімпульсним запуском.

Описаний прилад має порівняно низьку граничну частоту відліку імпульсів. Це пов'язано з тим, що через велику кількість груп підкатодів розряду потрібен час для переходу з одного індикаторного катода на інший. Тому частота по максимуму є обмеженою

$$f_{rob} = \frac{1}{K\tau_{min}},$$

де τ_{min} – мінімальна тривалість керуючих імпульсів, K – кількість електродів (підкатодів та катодів), що беруть участь в перенесенні розряду на одну позицію (для двохімпульсного декатрона $K = 3$).

Величина τ_{min} визначається часом запізнювання перенесення розряду з катода на катод, часом встановлення стаціонарних умов підготовки, часом відновлення електричної міцності проміжку. З формули випливає, що одним із шляхів підвищення робочої частоти є зменшення кількості підкатодів, що обумовило появу декатронів з $K = 2$ та $K = 1$.

Прикладом одноімпульсного декатрона з $K = 2$ є прилад з напрямленими катодами. Логічна схема такого декатрона представлена на рис. 2.7. Кожна комірка має односторонній зв'язок з сусідніми комірками. Схематичне зображення конструкції приладу та форма катода показані на рис. 2.8.

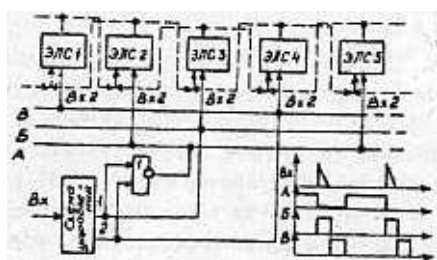


Рис. 2.7. Логічна схема декатрона з напрямленими електродами.

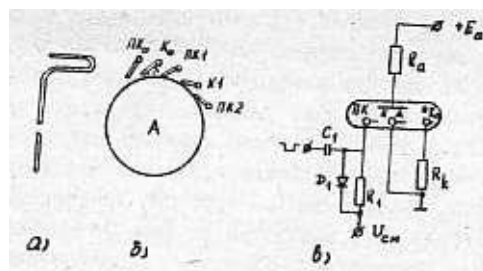


Рис. 2.8. Принципова схема розташування з'єднання електродів декатрона з напрямленими катодами: а) форма катода, б) розташування катодів, в) схема включення.

У цьому різновиді декатрона швидкість схеми вдалося підвищити за рахунок спеціальної форми катода. Катод виконується крюкоподібною форми, що сприяє

односпрямованому перенесенню. Катодна частина розряду формується в просвіті гачка, що працює в режимі порожнього катода. Розряд набуває конусну форму. Дифузія зарядів при такій формі розряду в більшій мірі спрямована в бік відкритої частини просвіту. Через те, що така конструкція катодів забезпечує спрямовану дифузію зарядів, то кількість катодів скорочено до 20. Підкатооди мають таку ж форму як і катоди.

Вхідні негативні імпульси, що підлягають рахунку, подаються разом з позитивною напругою зміщення в ланцюг підкатоодів. Підкатооди з'єднані між собою. Включений в ланцюг зміщення діод Д1 відводить надлишковий заряд від вхідного конденсатора С1, який накопичується на ньому від вхідних імпульсів.

При малій частоті вхідних імпульсів ($f = 500$ Гц) зміщення в ланцюзі підкатоодів подається через резистор.

Завдяки малій кількості проміжних ступенів переходу розряду гранична частота реєстрованого імпульсу в декатроні ОГ-8 досягає 100 кГц.

В декатроні А-107 підкатооди виключені повністю. Перенесення відбувається за рахунок несиметричної форми катода та ланцюга керування. В А-107 швидкість відліку 700 – 1500 кГц.

Крім багатокатодних існують, також, багатоанодні декатрони, найбільш поширеним з яких є двохімпульсні¹. Принцип роботи останнього практично не відрізняється від принципу роботи двохімпульсного багатокатодного декатрона.

2.4. БУДОВА І ПРИНЦИП ДІЇ ПАНЕЛІ ІЗ САМОСКАНУВАННЯМ

Існують різноманітні типи газорозрядних індикаторних панелей (ГІП). Встановилася певна класифікація ГІП, в основу якої лягли різні ознаки. Так, за конструктивними ознаками і принципом дії вони поділяються на три основні групи: панелі змінного струму, постійного і з само скануванням.

Для ГІП зі самоскануванням (ГІПС) характерні:

- системи електродів, що мають гальванічний контакт з плазмою;
- вбудований реєстр зсуву;
- простота схеми керування;

– простота способу модуляції яскравості.

Панелі зі самоскануванням можна розглядати як прилади, що складаються з сукупності функціональних комірок (ФК), додаючи або віднімаючи які, можна змінювати інформаційну ємність панелей.

Структурно ГПС складається з двох основних частин, пов'язаних всередині приладу одна з одною: індикаторної, де формується зображення, і скануючої, в якій здійснюється розгортка зображення. Індикаторна частина формується з безлічі комірок індикації (КІ), а скануюча – з комірок сканування (КС), розташованих по рядках і стовпчиках. КІ і КС пов'язані всередині приладу певним чином і становлять функціональну комірку.

На кожен КС і КІ припадають свої ділянки катодів і анодів електродних підсистем. При роботі панелі в одній з КС кожного рядка горить газовий розряд, який під дією зовнішньої схеми починає послідовно перекидатися від однієї КС рядка до іншої в напрямку від нульової КС до останньої. Коли припиниться розряд в останній КС запалюється нульова КС, і цикл повторюється, тобто проходить сканування розряду. Цей процес подібний розгортці променя ЕПТ, тільки тут розгортка відбувається по всіх рядках одночасно.

Включені КС управляють пов'язаними з ними КІ, сприяючи їх запалюванню. Якщо на підсистему електродів індикаторної частини від схеми управління подати імпульси, загораються тільки ті КІ, які пов'язані з палаючими КС. Функціонально цей процес еквівалентний модуляції променя в ЕПТ.

З тих КІ, що світяться після запалювання розряду, синтезується зображення. Найважливіша відміна особливості панелі з самоскануванням в тому, що з двох комірок, що знаходяться під однією різницею потенціалів, запалюється не довільна, а певна задана комірка. На рис. 2.9 зображені дві комірки Я1 і Я2 з ідентичними параметрами.

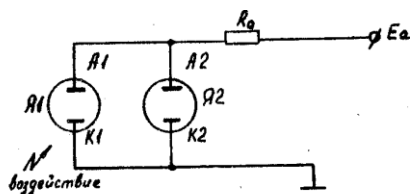


Рис. 2.9. Схематичне зображення об'єднаних ідентичних газорозрядних комірок.

Якщо на ці дві комірки подати напругу E_a , достатню для запалювання розряду, ймовірність запалювання розряду в Я1 (P) буде дорівнювати ймовірності запалювання розряду в Я2, тобто $P=1/2$.

Після запалювання розряду в одній з комірок напруга на іншому аноді падає до напруги підтримки розряду в комірці, яка пробилася. Цієї напруги недостатньо для запалювання розряду в другій комірці. Для того щоб ймовірність запалювання Я1 прямувала до одиниці, необхідно до Я1 докласти додатковий зовнішній вплив:

1) опромінення світлом відповідної довжини хвилі, що призведе до зниження статичного часу запізнювання запалювання розряду і відповідно більшої ймовірності запалювання розряду в Я1 в порівнянні з Я2, або зниження напруги виникнення розряду Я1 для певних типів газового наповнення.

2) ввід заряджених частинок в Я1, що понизить напругу запалювання Я1 и, відповідно, забезпечить більшу ймовірність запалювання Я1 в порівнянні з Я2.

3) вплив обома чинниками – випромінюванням і інжекцією заряджених частинок.

У ГПС реалізуються обидва способи підготовки. Перший використовується при підготовці комірок індикації комірками сканування, другий при підготовці КС.

Конструктивно зв'язок між КІ та КС в ГПС може виконуватися:

через отвір малого діаметру (інжекційний отвір, (рис. 2.10, а);

канали зв'язку (рис. 2.10, б).

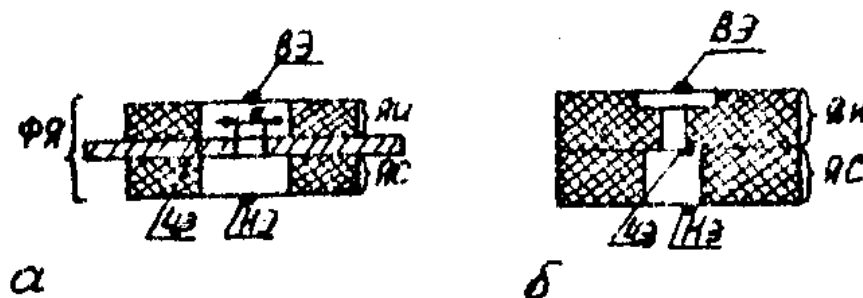


Рис. 2.10. Приклади конструкції функціональних комірок:

а – з інжекційними отворами; б – з каналами зв'язку; ВЕ – верхній електрод; ЦЕ – центральний; НЕ – нижній.

До складу КІ входять верхній електрод ВЕ, звернена до нього поверхня центрального електрода ЦЕ та отвір в діелектричному ізоляторі, що розділяє електроди. До складу КС – нижній електрод НЕ, звернена до нього поверхня ЦЕ, та отвір в діелектричному ізоляторі, що розділяє електроди. Обидві комірки пов'язані одна з одною інжекційним отвором в ЦЕ.

Розглянемо конструкцію панелі з самоскануванням. Скануюча частина містить аноди сканування, що виготовляються з тонкого дроту та катодну систему електродів, загальну для всіх анодів сканування (рис. 2.11 а, б). Катодна система виготовляється з тонкої металевої стрічки методом фотолітографії і складається з безлічі катодних смужок, розташованих перпендикулярно до анода сканування та об'єднаних за допомогою розвідної шини, і одного нульового катода K_0 . Для панелі на 16 знакомісць катодні смужки об'єднані в три групи (1 гр, 2 гр, 3 гр.) Катодна система електродів впритул притискається до нижньої скляної пластини, при цьому працюючі – ті ділянки катодів, які обмежені пазами, прорізнаними в склі. Аноди сканування укладають на дно пазів таким чином, що один паз доводиться на один анод. В результаті утворюються ізольовані один від одного розрядні канали з індивідуальними анодами і загальною катодною системою електродів.

Таким чином, скануюча частина панелі уявляє собою сукупність безлічі декатронів з лінійним розташуванням електродів. Для підключення до електричної схеми від скануючої частини відводяться три виводи від груп катодів та по одному виводу від K_0 і анодів сканування, об'єднаних через резистори.

Індикаторна частина містить аноди індикації, виготовлені із тонкого дроту і діелектричну матрицю з отворами. Діелектрична матриця з лицьового боку, зверненому до оператора, зачорнена для підвищення контрасту. Стінки комірок діелектричної матриці для збільшення кута огляду – білі. Аноди індикації розташовані на матриці і проходять уздовж осі розташування отворів рядку паралельно анодам сканування. Діаметр анодів індикації значно менше діаметра отворів в матриці, тому вони не перекривають отвори, і оператор добре бачить світіння комірок індикації. Кількість виводів індикаторної панелі дорівнює кількості анодів індикації.

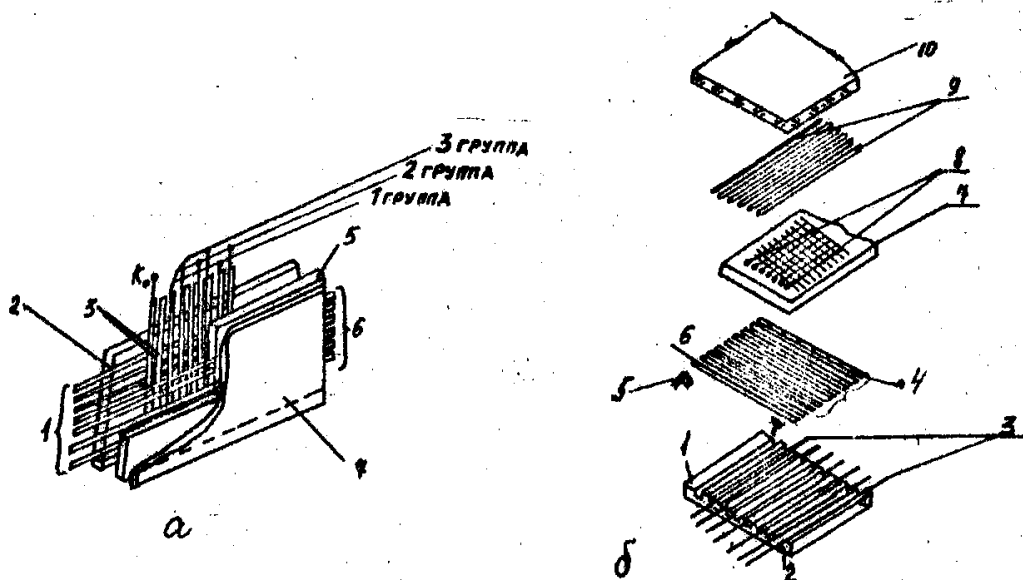


Рис. 2.11. Схематичне зображення:

а – конструкції панелі з само скануванням: 1 – аноди сканування; 2 – нижня скляна пластина; 3 – інжекційні отвори; 4 – катодна система електродів; 5 – діелектрична матриця; 6 – аноди індикації; 7 – верхня скляна пластина;

б – конструкція ГПС: 1 – нижня пластина; 2 – канавки; 3 – аноди сканування, 4 – катоди; 5 – катоди підпалу; 6 – катод скидання; 7 – діелектрична матриця; 8 – інжекційні отвори; 9 – аноди індикації; 10 – верхня скляна пластина.

Катодна система електродів – загальна і бере участь в роботі обох частин панелі. Скануюча і індикаторні частини панелі сполучаються через інжекційні отвори, виконані в катодах методом фотолітографії, або лазерної прошивкою. Всі складені деталі створюють щільну упаковку і з комірок сканування формуються функціональні комірки. Зверху панель закривається лицьовим склом і по периметру герметизується “склокристалічним” цементом. На нижній пластині, крім того, розташований штенгель для відкачування та наповнення сумішшю на основі неону і ксенону з додаванням парів ртуті.

Конструктивні елементи панелі повинні відповідати вимогам, що пред'являються до сучасного індикаторного приладу: забезпечення заданих тактико-технічних параметрів, висока надійність роботи, тривалий термін служби та ін.

Від газового наповнення залежать такі світлотехнічні характеристики, як колір, яскравість, електричні параметри, а також термін служби панелі.

Важливий момент в обґрунтуванні конструкції приладу – вибір діаметра інжекційного отвору. З одного боку, діаметр повинен бути досить великий, щоб через отвір проходила необхідна інжекція заряджених частинок і технологія виготовлення отворів була порівняно простою, а з іншого, – діаметр інжекційного отвору обмежений вимогою малого паразитного підсвічування і відсутністю проникнення розряду з комірки сканування в комірку індикації.

Для простоти принцип роботи панелі покажемо на прикладі функціонування тільки одного рядка (рис. 2.12, а). Робота інших рядків аналогічна. Розряди переміщуються в усіх рядках паралельно і практично одночасно.

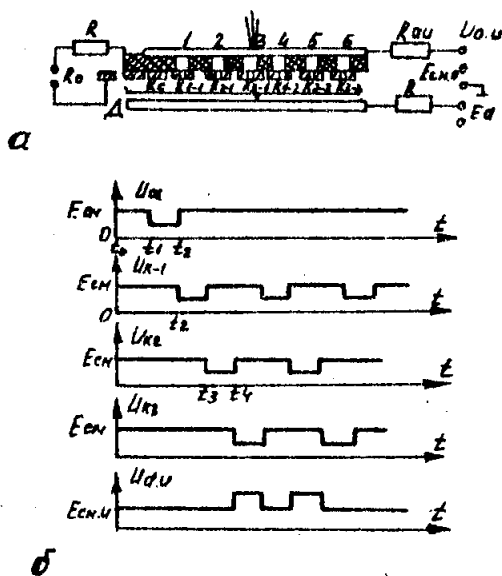


Рис. 2.12. Схема підключення одного рядка ГПС: розряду (а) і діаграми напруги на електродах (б).

Катооди груп К1, К2, К3 приєднані до трьох шин схеми керування з напругами U_{K1} , U_{K2} , U_{K3} . При включенні джерела живлення E_a виникає розряд лише в системі чергових електродів Д. Цей розряд постійно підтримується і використовується як джерело початкової іонізації, дія якого локалізована в області катода скидання K_0 . Розряд на інших катодах звичайно не переходить.

Багатостійка схема управління формує імпульси $U_{к.с.}$, U_{K1} , U_{K2} , U_{K3} . Імпульс на катод скидання K_0 виникає в інтервалі часу $t_1 - t_2$. При цьому завдяки підготовчій дії чергового розряду на катоді скидання досить швидко виникає розряд. Після закінчення імпульсу скидання розряд на K_0 припиняється, одночасно в інтервалі часу $t_1 - t_2$ подається імпульс на катод $K1$, який призводить до перенесення розряду на катод $K1-1$, розташований найближче до K_0 . Аналогічним чином закінчення імпульсу на $K1$ і початок імпульсу на $K2$ призводить до перенесення розряду на $K2-1$, закінчення імпульсу на $K2$ і початок імпульсу на $K3$ – до перенесення розряду на $K3-1$ і т.д. Таким чином, при перемиканні керуючої схеми з трьома стійкими станами відбувається спрямоване перенесення (сканування) розряду вздовж рядка, що містить будь-яку кількість електродів, об'єднаних у три групи. Після досягнення розрядом останнього з електродів рядка, виробляється імпульс скидання, розряд повертається на K_0 , після чого цикл повторюється.

Через малі розміри отворів в катодах, світіння скануючого розряду практично не сприймається оператором. Для створення зображення використовується світіння, що виникає в отворах діелектричної матриці (комірки 1 – 6). З цією метою на певних тактах на індикаторний анод подають імпульси напруги U_{ai} , в результаті дії яких запалюється комірка, навпроти якої в даному такті існує розряд. Завдяки наявності резистора R_a напруга між анодом індикації і катодом стає менше напруги виникнення розряду, чим запобігається можливість перекидання розряду на інші катода. Через те, що індикаторний катод проходить через всі комірки даного рядка, для надійного вибору комірки напруга виникнення розряду має значно знижуватися під дією підготовчого розряду.

Питання для самоперевірки

1. Структурна будова панелі з самоскануванням.
2. Поясніть принцип роботи ГПС.
3. Режими роботи функціональної комірки.
4. Умови працездатності ГПС.

5. Особливості механізму внутрішнього зв'язку між комірками.
6. Принцип роботи скануючої і індикаторної частин приладу.
7. Який розряд використовується в індикаторних приладах?
8. Назвіть статичні і динамічні параметри ГПС.
9. Поясніть зв'язок електричних параметрів з конструкцією приладу.
10. Де знайшли застосування ГПС?

3. ІОННО-ПЛАЗМОВІ ПРИСТРОЇ ТА ОБЛАДНАННЯ

3.1. ПРОЦЕСИ, ЩО ПРОТІКАЮТЬ В ТВЕРДОМУ ТІЛІ ПРИ ЕЛЕКТРОННОМУ ТА ІОННОМУ БОМБАРДУВАННІ

Основу технологічних операцій з використанням електронно-іонного опромінення складають складні фізико-хімічні процеси в поверхневих шарах твердого тіла, процеси в парах і газу при проходженні потоку заряджених частинок. При взаємодії заряджених частинок з молекулами речовини, що знаходиться в газоподібному стані відбувається збудження, іонізація і дисоціація молекул. При взаємодії заряджених частинок з твердим тілом відбуваються більш складні процеси. Характер та інтенсивність цих процесів залежить від виду опромінення, швидкості заряджених частинок, властивостей твердого тіла та інших факторів.

При опроміненні твердого тіла пучком швидких електронів відбувається відбивання частини пучка. Але значна частина електронів проникає на деяку глибину, зазнає при цьому гальмування за рахунок взаємодії з електронами речовини, що супроводжується нагрівом, рентгенівським випромінюванням, вторинною електронною емісією, виникненням дефектів у кристалі та іншими ефектами. Наприклад, при деяких умовах опромінення електронами може стимулювати хімічні реакції в поверхневому шарі твердого речовини, сприяти прискоренню процесів дифузії, викликати процеси дисоціації деяких сполук, що входять до складу твердого тіла, а також стимулювати процеси десорбції газу з поверхневих шарів твердого тіла.

Взаємодія іонів з речовиною починається ще при підльоті їх до поверхні твердого тіла. Справа в тому, що іони своїм електричним полем виробляють виривання електронів та іонів. Частина іонів, що проникли всередину речовини, відбивається в вакуум у вигляді іонів, нейтральних і збуджених атомів. Основна частина іонів, проникаючих всередину речовини, загальмовується в результаті різних процесів взаємодії з ядрами речовини і електронними оболонками атомів. Іони на своєму шляху можуть нейтралізуватися, перетворюючись на швидкі атоми, потім знову іонізовуватися, можуть вибивати атоми з вузлів кристалічної ґратки. Ці атоми за певних умов можуть або зміщуватися у вакуум у вигляді атомів, іонів та

збуджених атомів, або викликати зсув інших атомів. У результаті взаємодії іонів з речовиною можуть створюватися каскади змішаних атомів, утворюватися вакансії та атоми в міжвузільях ґратки. Одночасно з цими процесами при іонному бомбардуванні може відбуватися вибивання електронів з речовини. Речовина внаслідок її збудження та іонізації її атомів може випустити видиме ультрафіолетове і рентгенівське випромінювання. За певних умов іони можуть осідати і нейтралізуватися на поверхні твердої речовини, утворюючи тонку плівку.

Деякі процеси, що протікають в твердому тілі при опроміненні зарядженими частинками, використовуються для технологічних цілей та складають основу електронно-іонної технології. До таких процесів відносяться:

- нагрів при гальмуванні частинок в речовині;
- катодне розпилення;
- утворення дефектів в кристалічній ґратці;
- впровадження іонів в глиб твердого тіла;
- стимулювання хімічних реакцій електронним бомбардуванням;
- хімічна взаємодія іонів з атомами тіла, що бомбардується та ін.

Деякі процеси, що не дають технологічного ефекту, можуть бути використані для контролю за ходом технологічного процесу (вторинна емісія, випромінювання і т. д.).

Багато які з перерахованих процесів протікають одночасно, проте в кожному конкретному випадку використовується лише один, відносна інтенсивність якого посилюється шляхом відповідного вибору режиму опромінення.

3.2. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОПЕРАЦІЇ, ЩО ВИКОНУЮТЬСЯ ЕЛЕКТРОННО-ІОННИМИ МЕТОДАМИ

Велика різноманітність ефектів, викликаних опроміненням твердого тіла потоками заряджених частинок, зумовило широкий діапазон технологічних операцій, виконуваних за допомогою електронно-іонних методів [5-7].

Для технологічних цілей особливо широко використовується теплова дія електронного бомбардування. Електронно-променеві методи умовно застосовується

при плавці металів у вакуумі, для зонної очистки, для зварювання, розмірної обробки і для інших цілей. Іонне бомбардування застосовується для очищення деталей, для нагріву заготовок при дифузійному зварюванні з вакуумі, для виготовлення отворів, для отримання плівок, для легування напівпровідників і для виконання деяких інших операцій.

Незважаючи на велику різноманітність технологічних операцій, які можуть здійснюватися електронно-іонними методами, їх можна згрупувати і представити у вигляді п'яти методів. Класифікаційною ознакою для них є характер процесів, що протікають в речовині при впливі пучків електронів та іонів. Причому ці процеси становлять основу тієї чи іншої технологічної операції. За цією ознакою серед методів електронно-іонної технології можна виділити наступні:

1. Методи електронно-іонного нагріву. Основу цих методів складають теплові процеси, що протікають при гальмуванні заряджених частинок в речовині, але призводять до її руйнування. До цієї групи відносяться електронно-променеві методи обезгажування, відпалу та плавки матеріалів, зварювання та паяння деталей з різних матеріалів променем електронів та іонів та інші методи.

2. Електронно та іонно-ерозійні методи, засновані на руйнуванні речовини та видаленні її часток, а результаті чого в твердому тілі утворюються заглиблення, канали або пази. До цих методів належать електронно-променевий метод розмірної обробки, метод випаровування речовини електронним нагрівом для отримання плівок, метод видалення забруднень допомогою іонного бомбардування, метод отримання плівок катодним розпиленням, метод виготовлення отворів і пазів іонним бомбардуванням та інші.

3. Методи, що використовують радіаційний вплив електронних та іонних пучків, в результаті якого змінюється будова кристалів, виникають дефекти у твердому тілі. У цю групу входять методи прискорення дифузії, методи зміни фізичних властивостей поверхні і т.д.

4. Методи, основну роль в яких грає хімічна дія електронних і іонних пучків. Вона проявляється у стимулюванні процесів дисоціації складних хімічних сполук, прискорення процесів полімеризації при електронному бомбардуванні, а також у

хімічній взаємодії іонів з молекулами речовини, що бомбардується. Ці процеси становлять основу електронно-променевих методів обезгажування поверхонь, електронно-променевих та іонно-плазмових методів одержання металевих і полімерних плівок, а також деяких видів іонної розмірної обробки і електронолітографії.

5. Методи впровадження іонів в тверде тіло. У результаті цього досягається ефект легування поверхневого шару речовини. Цей метод відомий як метод іонного легування при виготовленні сонячних батарей та інших напівпровідникових приладів.

Деякі з основних технологічних операцій (відпал, обезгажування, очищення деталей, плавка і зварювання, фрезерування та свердління, отримання плівок та виготовлення мікросхем, легування та отримання переходів, прискорення процесів дифузії, запис інформації та контроль за ходом обробки), можуть виконуватися одним або кількома методами. Вибір методу визначається умовами, в яких здійснюється операція, і можливостями обладнання.

3.3. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОННО-ІОННОГО ОБЛАДНАННЯ

Для виконання більшості технологічних операцій розроблені спеціалізовані установки і кілька типів універсальних установок, призначених для виконання цілого комплексу операцій. По мірі вивчення закономірностей взаємодії пучків заряджених частинок з речовиною відкриваються нові можливості електронно-іонних методів і розширюється коло їх використання. Внаслідок розширення областей застосування електронно-іонних методів розробляються нові зразки обладнання технологічного призначення.

У зв'язку з швидким збільшенням загальної кількості установок та їх типів вивчення електронно-іонного обладнання доцільно почати з класифікації устаткування і ознайомлення з принципом будови основних вузлів. За основні ознаки класифікації можна прийняти вигляд заряджених частинок, що використовуються в установці в якості технологічного засобу.

По виду заряджених частинок, розрізняють:

1. електронні установки;
2. іонні установки;
3. комбіновані установки.

За характером взаємодії заряджених частинок з речовиною, який покладений в основу того чи іншого технологічного процесу, установки підрозділяють на наступні групи:

1. Електронно-нагрівальні установки, що використовують нагрів речовини при бомбардуванні зарядженими частинками.

2. Установки катодного розпилення, в яких основним процесом є розпорошення речовини при іонному бомбардуванні.

3. Установки легування та осадження плівок, що працюють на принципі перенесення речовини у вигляді іонів та осадження його на бомбардованій поверхні або впровадження іонів в кристалічну структуру речовини.

4. Іонно-плазмові установки, в яких для виконання технологічних операцій використовуються процеси в плазмі газового розряду і процеси взаємодії плазми з речовиною.

5. Установки, в яких використовуються хімічна дія електронів та іонів.

Один з можливих варіантів класифікації приведений на рис. 3.1. Наведена класифікація не є повною. Окремі групи установок можуть бути розділені на більш дрібні у відповідності з основними і додатковими ознаками. Наприклад, група електронно-іонних установок для отримання плівок може підрозділятися по виду заряджених частинок і способу формування пучків на наступні підгрупи:

1. Електронно-променеві установки, в яких для випаровування речовини використовується тонкий електронний промінь.

2. Іонні установки, в яких плівка створюється шляхом осадження іонів.

3. Іонно-плазмові установки, отримання плівок в яких відбувається за рахунок катодного розпилення.

4. Електронні установки, що працюють на принципі дисоціації хімічних сполук.

5. Газорозрядні установки для отримання полімерних плівок в умовах бомбардування електронами і іонами їх плазми газового розряду.

Дана класифікація може змінюватися відповідно до розвитку електронно-іонної технології та розробкою нових типів обладнання.

З усього різноманіття електронно-іонних установок ми розглянемо плазмові джерела електронів та плазмові джерела іонів.

Електронно-іонні установки										
Електронні			Іонні			Комбіновані				
За характером отримання та формування заряджених частинок										
Електронно-променеві			Ел. іонно-оптичні			Ел. іонно-плазмові				
За характером технологічних операцій										
Електронно-променеві установки для контролю	Електронно-іонні установки для виготовлення мікросхем	Установки для прискорення процесів полімеризації	Іонно-променеві установки для легування	Іонно-плазмові установки для травлення	Іонно-плізмові установки для очищення деталей	Електронно-іонні установки для розмірної обробки	Електронно-іонні установки для отримання плівок	Електронно-іонні установки для зварювання	Електронно-іонні плавильні установки	Установки електронного відпау та обезгажування

Рис. 3.1. Класифікація електронно-іонного обладнання.

3.4. ПРИНЦИП БУДОВИ ТА ОСНОВНІ ВУЗЛИ ЕЛЕКТРОННО-ІОННИХ УСТАНОВОК

Електронно-іонні установки значно відрізняються одна від одної за конструкцією, за виглядом і параметрами заряджених частинок, але тим не менше вони мають загальні принципи побудови окремих вузлів і блоків і деякі загальні властивості, обумовлені подібністю фізичних явищ, використовуваних для одержання і формування пучків електронів та іонів.

Принцип роботи і будови електронно-іонної установки визначається її призначенням, видом заряджених частинок, вимогами до параметрів пучків, процесами їх отримання та формування та фізичними явищами, викликаними бомбардуванням, і т. д. Будь-яка електронно-іонна, установка повинна містити вузли та елементи, за допомогою яких здійснюється отримання, прискорення і формування пучків електронів та іонів, їх фокусування і відхилення, а в ряді випадків і фільтрація іонів по масах, а також проводиться контроль за роботою вузлів і процесами взаємодії пучків з речовиною. У загальному випадку принцип будови електронно-іонної установки може бути представлений у вигляді блок-схеми, показаної на рис. 3.2.

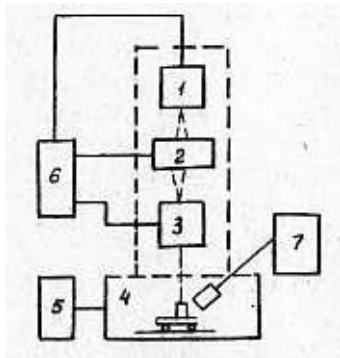


Рис. 3.2. Приклад блок-схеми електронно-іонної установки.

- 1 – джерело заряджених частинок,
- 2 – фокусуюча система,
- 3 – система відхилення променя,
- 4 – робоча камера,
- 5 – засоби відкачування,
- 6 – блок живлення джерела частинок і систем управління пучком,
- 7 – пристрій контролю за ходом технологічного процесу.

У джерелі 1 отримується та формується потік частинок. Потім він фокусується в системі 2 і пристроєм управління 3 направляється на бомбардований об'єкт в робочу камеру. За допомогою насосної групи 5 в робочій камері та в прискорювальній колонні підтримується певний тиск, при якому відбувається формування потоку і здійснюється вплив на об'єкт. Живлення джерела частинок і

пристроїв прискорення, формування фокусування і керування потоком здійснюється від блоку живлення 6.

У ряді випадків блок-схема електронно-іонної установки може істотно відрізнятись від розглянутої. Наприклад, в установці для виготовлення інтегральних мікросхем введені дві системи джерел частинок – електронна гармата і джерело іонів твердих речовин і випаровуванням та іонізацією парів електронним бомбардуванням. Застосована і більш складна схема отримання вакууму, ніж у електронно-променевих установках.

В іонних та електронно-променевих установках технологічного призначення в більшості випадків використовуються пучки заряджених частинок з енергіями $1 \div 200$ кеВ. Для отримання потоку частинок з такими енергіями застосовується пряме прискорення в електричних полях, створюваних між електродами електронної гармати або іонного джерела. Тільки в окремих установках, коли потрібно застосовувати потоки частинок з великими енергіями, в установку включаються пристрої для додаткового прискорення. Потік заряджених частинок з потрібною енергією, сформований в електронній гарматі або в іонному джерелі, прямує в фокусуєчі пристрої. В електронно-променевих установках для фокусування променя використовуються переважно магнітні електронні лінзи і лише в деяких установках можна зустріти поодинокі електростатичні лінзи. Для фокусування іонних пучків застосовують електростатичні лінзи та квадрупольні магнітні та електростатичні лінзи. Управління пучками заряджених частинок здійснюється як за допомогою електростатичних, так і магнітних відхиляючих систем.

Під робочою камерою установки розуміють забезпечений пристроями для переміщення і системами спостереження герметизований об'єм, в якому здійснюється обробка пучками заряджених частинок. Конструкція і розміри робочих камер відрізняються великою різноманітністю. Зустрічаються установки, в яких роль робочої камери виконує скляний ковпак, існують установки зі складними вакуумними камерами, що мають систему шлюзів для завантаження деталей і подачі

їх під промінь. В окремих установках розміри вакуумних систем досягають десятків метрів.

У деяких випадках електронно-оптична система, зокрема, електронна гармата, розміщується безпосередньо в робочій камері і може переміщатися в трьох напрямках щодо оброблюваного виробу.

Невід'ємною частиною іонно-електронної установки є спеціальна вакуумна система, в яку входять насоси, масловідбивачі, пастки, вакуум-провід з клапанами і кранами, а також апаратура для вимірювання вакууму. Відповідно до вимог до рівню вакууму і швидкості відкачки можна зустріти кілька схем побудови вакуумних систем, у тому числі прості, що складаються з двох насосів і одного клапана, що забезпечують вакуум порядку 10^{-4} – 10^{-6} тор, та складні системи, призначені для одержання надвисокого вакууму, до складу яких входять кілька насосів, система кранів і виморожувачі пастки.

Джерела заряджених частинок.

В установках технологічного призначення в якості основного технологічного засобу використовуються пучки електронів та іонів у вигляді тонких променів. У якості джерел електронів використовуються розжарені катоди з чистих металів або тугоплавких сполук, а також плазмові джерела, засновані на витяганні електронів з плазми газового розряду. Для отримання іонів в технологічних установках використовуються переважно плазмові джерела іонів. Нашим завданням є вивчення джерел заряджених частинок – електронних і іонних, фізичних процесів, що протікають в них, а також розгляд окремих конструкцій і вузлів електронних і іонних джерел.

3.5. ЕМІСІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАЗМИ

Унікальним за своїми властивостями емітером заряджених частинок є плазма. Унікальність полягає насамперед у тому, що плазма може емітувати як електрони, так і іони. Бомбардування потоком іонів не є для плазми руйнуючим фактором.

Електронні потоки можна отримувати в принципі за допомогою термокатодів. Але випаровування матеріалів, газовідділення з нього, пов'язане з нагріванням до високої температури, необхідність в періодичній розгерметизації технологічних установок для зміни оброблюваних деталей створюють умови абсолютно непридатні для роботи ефективних термокатодів на основі окислів лужноземельних матеріалів. Навіть стійкі до хімічного отруєння катоди на основі LiB_6 швидко виходять з ладу, оскільки вони є чутливими до запилення поверхневого шару парами оброблюваних матеріалів.

Через це в технологічних установках, робота яких пов'язана з формуванням і прискоренням електронних пучків, найчастіше використовуються чисто металеві термокатоди з вольфраму та танталу. Ці метали не є ефективними термокатадами. Катоди з цих металів не забезпечують задовільного терміну служби, коли їх поверхня бомбардується іонами. Іони в умовах поганого вакууму утворюються за рахунок іонізації залишкового газу і пари оброблюваного матеріалу.

Що стосується іонних пучків, то твердотільні емітери, які забезпечують іонні струми необхідної щільності, в даний час не відомі.

Зіставимо між собою властивості твердотільного і плазмового емітерів.

Відбір заряджених частинок з плазми проводиться з кордону плазма-вакуум. Яким чином формується ця межа, обговоримо далі. Розглянемо емісію електронів.

Як і у випадку твердотільного катода, електрони долають кордон плазма-вакуум за рахунок енергії теплового руху. Як при емісії електронів з твердого тіла, так і з плазми щільність емісійного струму електронів I_e може бути визначена таким чином:

$$I_e = en_e \int_{\sqrt{2W/m}}^{\infty} V_z f(V_z) dV_z, \quad (3.1)$$

де e – заряд електрона, n_e – об'ємна щільність електронів, V_z – складова теплової швидкості в напрямку емісійного струму, $f(V_z)$ – функція розподілу електронів за швидкостями, W – потенційна енергія електрона в емітері.

В металі електрони підпорядковані розподілу Фермі:

$$f(V_z) = \frac{4\pi m}{h^3 kT} \ln \left\{ 1 + \exp \left[\frac{m}{2kT} (V_f^2 - V_z^2) \right] \right\}, \quad (3.2)$$

де T – температура металу, $V_f = \sqrt{2W_f/m}$, $W_f = W_{f0} \left[1 - \frac{\pi}{12} \left(\frac{kT}{W_{f0}} \right)^2 \right]$ – енергія Фермі,

$W_{f0} = \frac{h^2}{2m} (3n_e/8\pi)^{2/3}$ – енергія Фермі при $T^\circ \text{ К}$. Якщо виконати інтегрування у виразі (3.1), підставивши $f(V_z)$ у вигляді (3.2), то отримаємо відому формулу для щільності емісійного струму металевго емітера

$$I_e = AT^2 \exp(-e\varphi/kT), \quad (3.3)$$

де $e\varphi = W_a - W_{f0}$ – ефективна робота виходу електрона з емітера, A – постійна, що залежить від матеріалу емітера. З експериментальних даних і розрахунків за формулою (3.3) відомо, що щільність струму при типових значеннях температури та φ лежить в межах від декількох десятих долей до одиниць ампер з квадратного сантиметра. Це говорить про те, що більшість електронів відбивається від потенційного бар'єру, існуючого на кордоні тверде тіло-вакуум.

В плазмі функція розподілу електронів за енергіями може бути записана як розподіл Максвелла:

$$f(V_z) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT_e}} \exp\left(-\frac{mV_z^2}{2kT_e}\right). \quad (3.4)$$

Для заряджених частинок плазми справедливе співвідношення: $W \ll 2kT_e$. На цій підставі при обчисленні інтеграла (3.1) для плазми приймають наближено нижню границю інтегрування рівною 0. При цьому в результаті обчислень виходить

$$I_e = \frac{1}{4} en_e \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m}}. \quad (3.5)$$

Вираз (3.5) визначає щільність струму електронів, емітованих плазмовим катодом. Видно, що щільність емісійного струму дорівнює щільності хаотичного струму електронів в плазмі.

Для сучасних твердотільних катодів при роботі в неперервному режимі щільність струму емісії має порядок 10^5 А/м^2 . При температурі електронів порядку 10^4 К , що часто зустрічається на практиці, розрахунок за формулою (3.5) показує,

що для отримання щільності струму емісії 10^5 А/см² необхідна плазма з концентрацією електронів $n_e \approx 10^{18}$ м⁻³. Отримання плазми з такою ж і навіть більшою об'ємною щільністю зарядів не викликає будь-яких ускладнень. В даний час за допомогою плазових емітерів отримують струми електронів щільністю в кілька тисяч ампер на квадратний сантиметр.

Щільність струму емісії позитивних іонів можна визначити як струм насичення в ланцюзі негативного електрода, що збирає іони з плазми. На цій підставі використовуємо вираз для щільності іонного струму насичення I_i , що протікає в ланцюзі від'ємного по відношенню до плазми зонда:

$$I_i = 0,4en_i\sqrt{\frac{8kT_i}{M}}. \quad (3.6)$$

де n_i – концентрація позитивних іонів в плазмі (для однозарядних іонів $n_i \approx n_e$, M – маса іона).

Отримані формули (3.5) та (3.6) дозволяють зробити висновок про те, що для збільшення емісійної здатності плазми необхідно вжити заходів щодо збільшення концентрації заряджених частинок в плазмі та температури електронів.

Зроблений висновок чітко реалізується при побудові реальних плазменно-емісійних систем. Для збільшення концентрації заряджених частинок плазма піддається стисненню (контрагуванню). Застосовується як механічне стиснення плазми при пропущенні її через звуження в спеціальному електроді, так і магнітне стиснення, засноване на тому, що заряджені частинки плазми утримуються силовими лініями магнітного поля. При стисненні плазми збільшується і температура електронів.

В даний час розроблено велику кількість різних систем з використанням плазми в якості джерел електродів або іонів. Розглянемо деякі з них.

3.6. ДЖЕРЕЛА ІОНІВ

Джерела іонів в даний час широко застосовуються як елементи іонно-променевих установок в прискорювачах заряджених частинок, мас-спектрометрах, в установках для розділення ізотопів, а також як самостійні пристрої, призначені для технологічних цілей, травлення і очищення поверхні, осадження плівок і т.д.

Отримання потоку вільних іонів базується на іонізації атомів на поверхні твердого тіла, іонізації газу або парів електронним пучком, на витяганні іонів з плазми газового розряду і т.д.

Плазмові джерела доцільно класифікувати за способом одержання в них газового розряду низького тиску. Цей принцип але буде сильно порушений, якщо джерела об'єднати за типом катода. За цією ознакою можна розділити іонні джерела на 3 групи:

1. Джерела з розжареним катодом. До цієї групи можна віднести іонні джерела з звуженням розрядної трубки, джерела з прямим дуговим розрядом та розрядом з осциляцією електронів в магнітному полі, діоплазматрон;
2. Джерела з холодним катодом;
3. Джерела з високочастотним розрядом.

Вплив магнітного поля на плазму. Розряд з катодом розжарювання в магнітному полі і його використання в якості джерела іонів

Зовнішнє магнітне поле суттєво впливає на плазму газового розряду.

Ми розглянемо цей вплив на плазму розряду з катодом розжарювання.

Це виражається в наступному:

1. Магнітне поле впливає на траєкторію первинних електронів, емітованих катодом і прискорених в подвійному шарі біля катода. Магнітне поле колімує пучок цих електронів і перешкоджає попаданню цих електронів на інші електроди (наприклад, на анод). Воно збільшує середню тривалість перебування електронів в міжелектродному просторі і тим самим посилює іонізацію.

Радіус кривизни траєкторії електрона в магнітному полі визначається з умови рівності лоренцевої та доцентрової сил та дорівнює

$$r_e = \frac{1}{H} \sqrt{2 \frac{m}{e} V} = 3,37 \sqrt{\frac{V}{H}}, [\text{см}], \quad (3.7)$$

де V – швидкість електронів, спрямована перпендикулярно лініям магнітного поля і виражена в еВ; H – в ерстедах.

Вже при відносно слабких магнітних полях радіус кривизни виявляється досить малим. Первинні електрони рухаються в однорідному магнітному полі у вигляді пучка з перетином, рівним перетину катода.

При досить сильних магнітних полях, які іноді застосовують в іонних джерелах, радіус кривизни траєкторії повільних іонів також може виявитися порівнянним з характерними розмірами приладів.

Цей радіус

$$r_i = \frac{144}{H} \sqrt{\frac{\mu V}{Z}}, [\text{см}], \quad (3.8)$$

де Z – кратність заряду іона; μ – атомна вага.

Наприклад, при $\mu = 1$, $Z = 1$, $H = 1000$ Е, $r_i = 0,144$ см.

2. Магнітне поле впливає на дифузію заряджених частинок в напрямку, перпендикулярному полю.

Класична дифузія пов'язана з парними зіткненнями. У слабоіонізованому газі дифузія є результатом зіткнень зарядів з нейтральними частинками. У повністю іонізованому газі – результатом зіткнень заряджених частинок між собою. Вплив магнітного поля призводить до зменшення ефективного вільного пробігу частинок.

Коефіцієнт дифузії електронів

$$D_{H\perp} = \frac{D_0}{1 + (\omega_H \tau)^2}, \quad (3.9)$$

де $\omega_H = \frac{eH}{mc}$; $\tau = \lambda_e / V_e$ – середній час між двома послідовними зіткненнями;

$D_0 = \lambda_e V_e / 3$ – коефіцієнт дифузії частинок в відсутності магнітного поля.

Нехай величина вільного пробігу визначається кулонівською взаємодією зарядів. Обчислимо величини коефіцієнта дифузії електронів вздовж магнітного поля і перпендикулярно сильному магнітному полю

$$D_{\parallel K} = \frac{10^{19} \left(\frac{kT_e}{e} \right)^{\frac{5}{2}}}{n_e}, [\text{см}^2/\text{с}], \quad (3.10)$$

$$D_{\perp K} = \frac{4,3 \cdot 10^{-4} n_e}{H^2 \left(\frac{kT_e}{e} \right)^{\frac{1}{2}}}, [\text{см}^2/\text{с}], \quad (3.11)$$

де n_e – концентрація часток; H – Е, kT_e/e – електронна температура, В.

З рівності (3.9) випливає, що сильне магнітне поле повинне істотно обмежувати поперечну дифузію електронів $[(\omega_H \tau)^2 \gg 1]$. Звичайно $D_H \sim \frac{1}{H^2}$. Іноді спостерігається аномальна дифузія. Причинами її вважають виникнення дрейфового руху електронів в схрещених полях, турбулентністю в плазмі.

Коефіцієнт такої аномальної дифузії

$$D_{aH} = \frac{6 \cdot 10^3}{H} \left(\frac{kT_e}{e} \right), [\text{см}^2/\text{с}], \quad (3.12)$$

де H – в кЕ.

Наприклад, при $H = 1$ кЕ, $n = 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $\frac{kT_e}{e} = 10$ В, $D_{aH} = 6 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$, в той час як D_{\perp} виявляється $\sim 100 \text{ см}^2/\text{с}$. Зазвичай перехід до аномальної дифузії відбувається при деякій критичній напруженості магнітного поля та супроводжується виникненням в розряді інтенсивних шумів.

Дуоплазмотрон

Дуоплазмотрон – один з найбільш розповсюджених плазмених джерел іонів (ПДІ) для отримання інтенсивних аксиальносиметричних пучків іонів. У зв'язку з цим його характеристики опишемо більш докладно. Конструкція дуомазмотрона показана на рис. 3.3. Генератор плазми (ГП) включає в себе розжарений або холодний катод 1, стискуючий електрод 2 та анод 3. Екстракція іонів із ГП відбувається завдяки витягуючому екстрактору 4. В ГП створюється неоднорідне магнітне поле електромагнітною котушкою або постійним магнітом 5. ГП встановлюється на високовольтному ізоляторі, що розрахований на повну

прискорюючи напругу. Тиск плазмоутворюючого газу в ГП близько 10 Па, а в прискорюючому проміжку – не вище 10^{-2} Па. В дуоплазмотроні для підвищення концентрації плазми 6 поблизу анодного отвору використовується подвійне стискання та контрагування розряду – механічне та магнітне. Розрядний струм від катода до анода практично не змінюється, через те, що стискаючий електрод під'єднується до анода через великий баластний опір, тому щільність розрядного струму у звуженні (а отже, концентрація плазми та електронна температура) буде вище, ніж в катодній області розряду. Ця обставина слугує причиною появи плазмового міхура 7 з катодного боку звуження та стрибка потенціалу в подвійному електростатичному шарі, які забезпечують струмопроходження в неоднорідній системі електродів. Падіння потенціалу в подвійному шарі пов'язане з параметрами плазми співвідношенням

$$U_{sl} = \frac{k}{l} \left[T_{l2} - T_{l1} + \frac{(T_{l1} - T_{l2})}{2} \ln \frac{n_{l2}}{n_{l1}} \right]$$

де T_{l1} , T_{l2} , – температура електронів в плазмі відповідно анодної та катодної; n_{l1} , n_{l2} – концентрація електронів в плазмі відповідно анодної та катодної. Зазвичай $U_{sl} = 20...50$ В та залежить від роду газу та тиску.

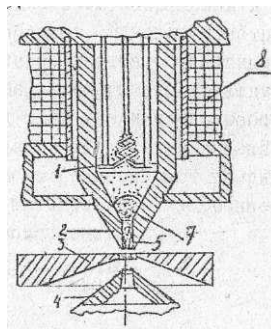


Рис. 3.3. Схема конструкції дуоплазмотрона: 1 – катод; 2 – стискаючий електрод; 3 – анод; 4 – екстрактор; 5 – постійний магніт; 6 – плазма, контрагована магнітним полем; 7 – плазмовий міхур; 8 – охолодження; 9 – жароміцна втулка.

Прискорені в шарі електрони мають велику іонізуючу здатність, тому з анодного боку шару виникає плазмовий згусток, що яскраво світиться з

підвищеними концентрацією та температурою заряджених частинок, з якого можна ефективно формувати пучок іонів.

Описана картина буде порушуватися при досягненні розрядним струмом деякого критичного значення

$$I_{kr} = aSP_0$$

де a – коефіцієнт, що залежить від роду газу; S – площа контрагуючого отвору; P_0 – його початковий тиск. При значенні I_{kr} відбувається обрив розряду, пов'язаний з виникненням розрядження в звуженні за рахунок електронного тиску:

$$\Delta P = j_e \sqrt{\frac{2m}{e}} U_{sl},$$

де j_e – щільність електронного струму в каналі. При наближенні до I_{kr} наростання ΔP відбувається лавиноподібно, тобто з'являється яскраво виражений додатній від'ємний зворотній зв'язок який веде до порушення стійкості існування розряду.

Стосовно ПДІ значення I_{kr} може бути оцінене за виразом

$$I_{kr} \approx a \sqrt{\frac{2\pi n_i}{kT}} q \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{(k)^2} \right],$$

де T – температура нейтральної компоненти; q – витрата газу; $k = d_a / d_k$, d_a , d_k – діаметр отвору відповідно в головному аноді та контрагуючому електроді. Звідси випливає, що максимальна сила стійкого струму розряду, контрагованого отвором у проміжному електроді, не залежить від абсолютних розмірів отворів в головному аноді та стискаючому електроді, а визначається їх відношенням, витратами та видом газу.

Установка стискаючого електрода підвищує концентрацію плазми поблизу анодного отвору приблизно на порядок.

В області між стискаючим електродом та анодом магнітної системи типу магнітної лінзи створюється різко неоднорідне магнітне поле з максимумом індукції в перетині анодного отвору, де B_m досягає 0,5...0,8 Тл. Магнітне поле додатково стискає розряд та збільшує концентрацію плазми біля анодного отвору також приблизно на порядок, Таким чином, механічне і магнітне стискання розряду призводять до зростання концентрації плазми біля анодного отвору приблизно у сто

разів. В цій області відзначалися концентрація плазми до $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ та густина струму іонів до 200 А/см^2 . Поздовжній розкид іонів пучка за швидкостями визначається величиною від'ємного анодного падіння. Спектр швидкостей іонів, витягнутих з дуоплазмотрона, на половинному рівні становить 5...10 В, що є його позитивною якістю у порівнянні з ПДІ інших типів.

Дуоплазмотрони бувають двох типів: класичний, який був розглянутий раніше, та такий, у якого анод виготовлений з немагнітного матеріалу, а магнітний потік замикається через стискаючий електрод та екстрактор.

Емісійні властивості дуоплазмотрона залежать від сили струму розряду I_p , роду і тиску газу P у ГП, індукції магнітного поля B_m та потенціалу стискаючого електрода. Залежності струму іонного пучка від вказаних факторів показані на рис. 3.4. При збільшенні I_p ріст I_n спостерігається доти, доки ступінь іонізації газу у анодному отворі не наблизиться до 100 %. При подальшому зростанні I_p починає позначатися видування нейтрального газу з області анодного отвору. Відношення сил струмів іонів різних речовин обернено пропорційне відношенню квадратних коренів їх мас. Збільшення B_m , як правило, призводить до зростання I_n внаслідок зменшення діаметру розрядного шнура поблизу анодного отвору. Однак надмірне збільшення B_m призводить до того, що значно зростає амплітуда змінної складової струму іонів, що виходить в діапазоні частот 100 кГц ... 50 МГц.

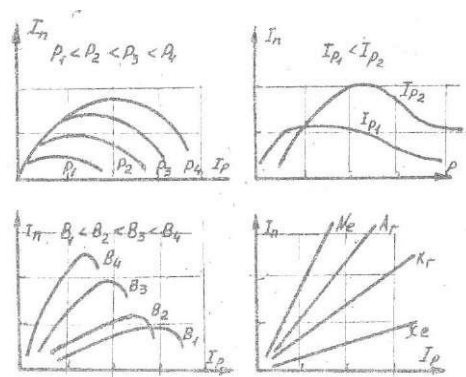


Рис. 3.4. Емісійні характеристики дуоплазмотрона

Криві, що характеризують залежність зміни емісійного струму від тиску P , мають максимум. Спочатку при зростанні P сила струму, що виходить зростає за

рахунок зростання концентрації плазми у анодному отворі, але починаючи з деякого тиску, коли довжина вільного пробігу електронів стає менше відстані від поверхні подвійного шару до анодного отвору, сила струму емісії починає падати. Зниження потенціалу знімаючого електрода U_{sl} нижче "плаваючого" призводить до зростання струму на значення, пропорційне значенню струму іонів на стискаючий електрод. Зростання сили струму пучка припиняється при U_{sl} , що відповідає повному запиранню електронного струму на стискаючий електрод.

Дуоплазмотрон характеризується наступними граничними параметрами: сила струму іонного пучка за воднем 1 А; енергія до 100 кеВ; газова економічність 0,96; енергетична ефективність 0,15 мА/Вт; густина іонного струму у анодному отворі до 85 А/см².

Подальшим розвитком принципу подвійного контрагування розряду стало створення дуопігатрона. У дуоплазмотроні створювалася щільна плазма, що дозволяло отримувати струм емісії іонів в десятки ампер на 1 см², тобто утворювалося "точкове" джерело іонів з малим перетіканням холодного газу з генератора плазми в прискорюючий проміжок. Разом з тим, іонно-оптичні системи (ІОС) не здатні формувати пучки з такою щільністю струму. Для цієї мети був запропонований спеціальний розширювач плазми – експандер, однак щільність емісійного струму на кордоні при цьому залишалася різко неоднорідною. Для усунення цієї неоднорідності за анодом були введені додаткова камера великого діаметру під потенціалом анода та антикатод, що дозволило отримати режим розряду з осцилюючими електронами. Антикато́дом зазвичай є на торці ГП емісійний електрод багатоапертурної ІОС.

Газомагнітронне ПДІ

При отриманні пучків іонів важких газів велике поширення отримало газомагнатронне ПДІ, розроблене Г. Кауфманом. Його принципова схема показана на рис. 3.5. В газорозрядній камері 1 горить розряд між розжареним спіральним або порожнистим катодом 2 та анодом 4 в аксіальному магнітному полі, створюваному котушкою електромагніту 5. Для вирівнювання концентрації нейтрального газу або

пари служить розподільник 3. Іонний пучок, як і в дуопігатрон, формується трьохелектродною багатоапертурною ІОС 6, 7, 8. Висока ймовірність іонізації робочого газу в ГП досягається тим, що електрони, активовані катодом, рухаються до анода в схрещених електричному та магнітному полях по довгих циклоїдальних траєкторіях, що значно збільшує час їхнього життя в об'ємі ГП. Все це дозволяє знизити робочий тиск до $5 \cdot 10^{-2}$ Па та підняти газову економічність η_g .

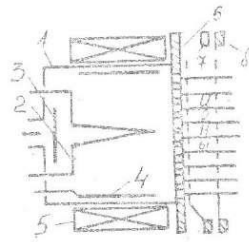


Рис. 3.5. Схема газоманітронного ПДІ: 1 – газорозрядна камера; 2 – катод, 3 – розподільник; 4 – анод; 5 – електромагніт; 6, 7, 8 – трьохелектродна ІОС

Властивості ПДІ Кауфмана можна характеризувати наступними даними: діаметр іонного пучка 30 см, маса 7,5 кг, споживана потужність 2,65 кВт, потужність пучка іонів Hg^+ 2,2 кВт, сила струму іонів 2 А при силі струму розряду 10 А, $\eta_g = 0,94$, «ціна» утворення іона 185...200 еВ/іон, напруга на розряді 37 В, термін служби 10000 годин.

3.7. ЕЛЕКТРОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ

Однією з основних частин будь електронно-іонної установки є система, що забезпечує отримання, прискорення, фокусування і відхилення потоків заряджених частинок. Цю систему називають електронно-оптичною або іонно-оптичною системою (ЕОС). Структура ЕОС залежить від вимог до параметрів пучка і від призначення установки. У загальному випадку ЕОС складається з джерела часток з системами прискорення і попереднього формування пучка, фокусуючих лінз і пристрою для відхилення пучка. Конструктивно ЕОС виконується у вигляді окремої колони, розміщеної на робочій камері або всередині її.

Структура електронно- та іонно-оптичних систем

Технологічні операції та умови їх виконання накладають вимоги при побудові ЕОС та виборі її структури.

У загальному випадку ЕОС повинна задовольняти наступним вимогам:

1. Система повинна формувати пучок з певними параметрами та геометричними розмірами.

2. Система повинна забезпечувати плавне керування певними параметрами пучка (струм у пучку, енергія частинок) при збереженні незмінних інших параметрів (фокусна відстань).

3. Відхилення пучка в певних межах не повинно супроводжуватися зміною діаметра пучка і розподілу частинок по перерізу.

4. ЕОС повинна бути досить довговічною, економічною (струм на електроди повинен бути мінімальний, простою по конструкції, зручною в налагодженні та експлуатації).

Структура ЕОС для електронних пучків істотно відрізняється від структури системи, призначеної для генерування та фокусування іонних пучків не тільки за конструкцією джерела заряджених частинок, але і за будовою відхиляючих систем.

ЕОС для отримання пучків

ЕОС для отримання та фокусування іонних пучків іноді називають іонно-оптичними системами. До складу таких систем крім джерел іонів і пристроїв для фокусування і відхилення пучків в деяких випадках включають пристрої для фільтрації іонів по масах.

Найбільш часто зустрічаються схеми іонно-оптичних систем показані на рис. 3.6. Найпростіша іонна система складається з двох електродів, між якими горить розряд, цей розряд є джерелом іонів. Крім цього є бомбардований об'єкт (рис. 3.6, а). Такі системи використовуються для обробки великих поверхонь.

Для отримання іонних пучків перерізом декілька см^2 і менше використовуються прості іонно-оптичні системи. Вони складаються або з одного джерела, або з джерела і однієї фокусної лінзи. В установках для легування та

отримання спектрально чистих плівок застосовуються іонно-оптичні системи, до складу яких входить іонне джерело, пристрій для прискорення, відхилення і поділу іонів по масах. В якості джерел іонів застосовують плазмові джерела. Вони мають більш високу ефективність, прості за конструкцією та надійні в роботі.

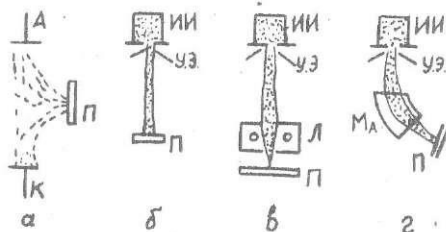


Рис. 3.6. Основні типи іонно-оптичних систем:

- а) система з відбором іонів з плазми, б) іонна гармата, в) іонно-оптична система з лінзою, г) система з магнітним мас-фільтром.

Конструктивно ЕОС для генерування та формування іонних пучків виконуються у вигляді автономних систем або прискорювальних колон. Їх іноді називають іонними гарматами та іонними джерелами.

Одна з конструкцій іонно-оптичної системи показана на рис. 3.7.

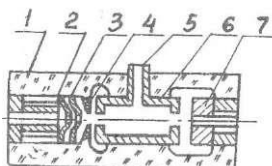


Рис. 3.7. Іонно-оптична система на 20 кВ. 1 – ізолятор, 2 – прискорюючий електрод, 3 – екстрактор, 4,7 – катоди, 5 – канал, 6 – анод.

Система складається з джерела з осциляцією електронів в магнітному полі, екстрактора під дією поля якого відбувається вилучення іонів з плазми, і прискорюючого електрода, що має потенціал 20 кВ. Конфігурація електродів підібрана так, що в процесі прискорення відбувається попереднє формування іонів в спрямований потік. Центрування електродів один щодо одного здійснюється за допомогою циліндричного ізолятора з кварцового скла.

Іонні гармати

Іонні та електронні гармати складаються з емітерів заряджених частинок та системи електродів, що слугує для вилучення іонів і формування іонного пучка з необхідними іонно-оптичними властивостями та енергією. Одним з цих електродів, який є одночасно і джерелом частинок, слугує межа плазми. Такі системи отримали назву систем з плазмовим фокусуванням. Розглянемо способи вилучення іонів та первинного формування іонного пучка.

Три способи вилучення іонів і первинного формування іонного пучка

Плазма потужного та ефективного іонного джерела має деякі характерні властивості. Вона має велику концентрацію іонів при значному ступені іонізації газового середовища $n_+/(n_+ + n_a)$ (де n_a – концентрація нейтральних атомів) та високу газову економічність, завдяки високому ступеню іонізації і великій електронній температурі T_e .

Вираз для газової економічності має вигляд:

$$\eta = \frac{j_+}{j_+ + j_a} = \frac{1}{1 + \frac{1}{0,8\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{T_a}{T_e}}}, \quad (3.13)$$

де $j_a = \frac{en_a V_a}{\varphi} = en_e \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi M}}$, де V_a – середня швидкість нейтральних частинок, T_a – відповідна температура, j_+ – з виразу (3.13).

З виразу (3.13) випливає, що при високій електронній температурі можна отримати η , близьке до 100 % при $n_+/n_a \gg 1$ та при $n_+/n_a \leq 1$.

Але мало створити плазму з необхідними параметрами. Потрібен оптимальний спосіб витягування іонів з плазми. Є 3 способи витягування (рис. 3.8).

Електронні та іонні струми, що йдуть на ізольовану від плазми стінку, дорівнюють

$$0,4en_+ \sqrt{\frac{2kT_e}{M}} = \frac{en_e V_e}{4} \exp\left(-\frac{e\varphi}{kT_e}\right). \quad (3.14)$$

Стінка заряджається до потенціалу

$$\varphi = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1}{0,8\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{M}{m}}. \quad (3.15)$$

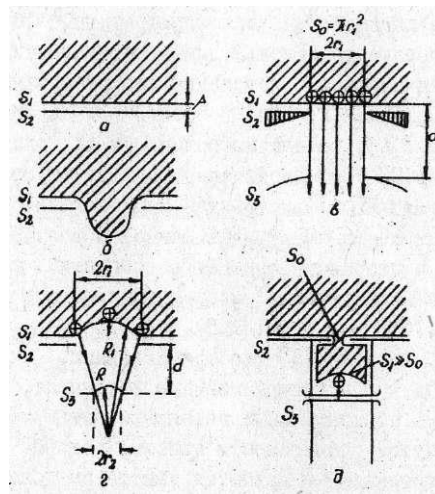


Рис. 3.8. Способи видобування іонів з плазових джерел.

а) межа плазми віддалена від стінки, б) плазма проникає з джерела назовні, в) відбір іонів з кордону плазми, розташованого поблизу площини вихідного отвору, г) відбір іонів з кордону плазми, що знаходиться всередині джерела, д) відбір іонів з кордону плазми, що знаходиться далеко за межами джерела.

При цьому межа плазми S_1 віддалена від стінки S_2 (рис. 3.8) на відстань порядку дебайвської довжини екранування. У звичайних умовах іонного джерела ця відстань становить невелику частку міліметра. Якщо в стінці S_2 зробити отвір діаметром більше 2Δ , то плазма проникає з іонного джерела назовні (рис. 3.8). При досить великому негативному потенціалі електрода S_3 (екстрактор – витягуючий електрод) та відповідної формі електродів можна повернути межу плазми приблизно в площину вихідного отвору так, що вона буде джерелом прямолінійно поширюваного пучка іонів, зі струмом $I_+ = j_+ S_0$ (рис. 3.8, в).

Такий спосіб вилучення – не єдиний. Помістимо електрод S_3 в камеру іонного джерела, подамо на нього достатній негативний потенціал. Цим можна добитися утворення увігнутої поверхні плазми, яка знаходиться всередині іонного джерела та є емітером іонів, що проходять через отвір в електроді S_2 (рис. 3.8, г). При цьому емісійна поверхня S може бути значно більше перетину каналу $S_0 = \pi r_2^2$, усередині

якого проходить фокусуючий пучок іонів. Канал служить для зменшення натікання газу з іонного джерела в вакуум.

Таким чином можна підвищити газову економічність іонного джерела з відносно невеликим ступенем іонізації.

При третьому способі вилучення іонів, плазма проникає далеко за межі іонного джерела в вакуум. Перш ніж потрапити в область фокусуючого поля лінзи, плазма приймає розвинену поверхню, яка є власне джерелом частинок (рис. 3.3, д). В пласкій системі електричне поле поблизу прискорюючого електрода

$$E = 5600 I_+^{1/2} S^{-1/2} V_0^{1/4}, \quad (3.16)$$

де I_+ – струм пучка, A , S – його перетин, см^2 , V_0 – різницю потенціалів, V .

З цього виразу випливає, що третій спосіб дозволяє зменшити електричне поле E за рахунок збільшення емісійної поверхні плазми S . Зростання емісійної поверхні досягається без збільшення перерізу вихідного отвору іонного джерела S_0 , тобто без підвищення витрат газу. Таким чином, підвищується електрична міцність системи формування іонного пучка. Щоб зіпівставити іонні гармати з електронними, користуються величиною еквівалентного первеанса

$$P = \frac{I_+}{V^{3/2}} \sqrt{\frac{M}{m}},$$

де I_+ – струм іонного пучка, A ; V – прискорюча напруга, V .

Електронні лінзи

Для фокусування пучків заряджених частинок застосовують електронно-оптичні пристрої, що створюють квазістатичні, електричні та магнітні поля. Ці поля можуть змінювати траєкторію часток і фокусувати їх в промінь. Такі системи називаються електронними лінзами. У електронно-променевих установках використовуються електромагнітні лінзи. У іонно-променевих пристроях переважно застосовують електростатичні одиночні або квадрупольні лінзи.

Відхиляючі системи

До відхилення пучків в установках технологічного призначення вдаються в кількох випадках: для переміщення пучка по оброблюваній деталі; для юстування пучка і центрування його відносно оптичної осі, для створення імпульсного режиму обробки при живленні змінною або постійною напругою. У відповідності з цими призначеннями розроблені спеціалізовані системи відхилення. Відхиляючими прийнято називати системи, призначені для розгортання променя по растру або переміщення його по оброблюваному контуру на поверхні деталі.

Юстуючі системи відповідають своєму призначенню. Системи, призначені для створення імпульсного режиму шляхом пропускання скануючого із заданою частотою променя через щільову діафрагму, називають бланкуючими або, іноді, відхиляючими.

Для відхилення пучка використовуються електричні та магнітні поля, створювані за допомогою електромагнітних систем.

Конструкції систем визначаються в загальному випадку їх призначенням та конструкцією ЕОС, до складу якої вони входять.

Масфільтри іонних установок

Для легування напівпровідників методом іонної імплантації та отримання надчистих плівок методом іонного осадження потрібен пучок іонів певного масового складу, в якому практично відсутні іони будь-яких домішок. Для фільтрації іонів використовують кілька методів, серед яких найбільш відомим є магнітний сепаратор, динамічний квадрупольний масфільтр та динамічний електромагнітний високочастотний масфільтр.

Магнітні масфільтри

Принцип поділу рухомих в магнітному полі іонів по масах заснований на наступному. Іони з однаковою швидкістю завертаються магнітним полем по радіусу, величина якого пропорційна кореню квадратному з відношення маси іона до його заряду

$$r = \sqrt{\frac{2V}{B}} \sqrt{\frac{m}{e}},$$

де V – прискорююча напруга, B – напруженість магнітного поля.

Принцип роботи сепаратора показаний на рис. 3.9. У пучку містяться три компоненти іонів. При проходженні секторного магнітного поля іони розділяються по масам і надходять на мішень у точки B , B_1 , B_2 . Магнітні масфільтри застосовують при легуванні. Їх виготовляють з електромагнітом, вага та габарити якого визначаються енергією сепаруючих іонів. До недоліків магнітних масфільтрів крім великої ваги і габаритів відносяться критичність до розкиду іонів за енергіями, високі вимоги до стабільності струму, збудження електромагніту та висока енергоємність.

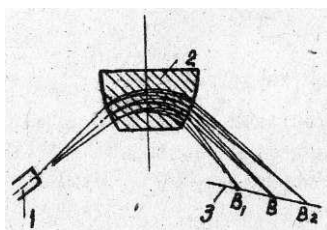


Рис. 3.9. Магнітний мас-аналізатор: 1 – іонне джерело, 2 – магнітне поле, 3 – мішень.

В установці для виготовлення інтегральних схем встановлений імпульсний масфільтр, що має порівняльно малі габарити. Принцип будови масфільтра показаний на рис. 3.10.

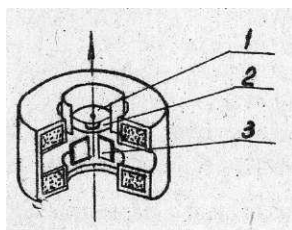


Рис. 3.10. Імпульсний масфільтр: 1,2 – прискорюючі електроди, 3 – електроди для створення магнітного поля, що обертається.

Масфільтром є кільцевий магніт, всередині якого розташовані пластини, за допомогою яких створюється електричне поле, що обертається та два дискових електроди з осьовими отворами. Іони надходять в сепаратор через отвір перпендикулярно до осі та повертаються магнітним полем. Під дією поля, що

обертається, іони гальмуються та, рухаючись по спіралі, наближаються до осі. Іони виводяться на вісь, та направляються до мішені під дією прискорюючого поля дискових електродів. Частота поля, що обертається тривалість імпульсу та інші параметри підбираються так, щоб іони потрібної маси встигли згрупуватися на осі, а іони інших мас розкидалися на стінки камери.

Динамічний квадрупольний масфільтр

Динамічний квадрупольний масфільтр складається з чотирьох отворів, на які подається постійна або змінна високочастотна напруга. Вона створює гіперболічне поле (рис. 3.11).

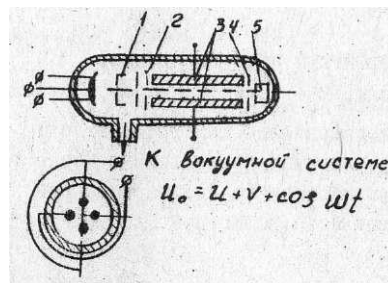


Рис. 3.11. Квадрупольний масфільтр. 1 – іонне джерело, 2 – вхідна діафрагма, 3 – стрижні, 4 – вихідна діафрагма, 5 – колектор.

Іонний пучок, що надходить у квадруполь, піддається дії електричного поля. Іони починають рухатися по складних траєкторіях, здійснюючи коливання в гіперболічному полі. Параметри квадруполя, частоту та амплітуду змінного напрямку можна підібрати так, що іони певної маси будуть рухатися поблизу осі квадруполя і пройдуть на колектор, а іони інших мас, здійснюючи коливання з амплітудою, що збільшується будуть осідати на стінках екрану та стрижнях. Такий масфільтр відрізняється простою конструкцією, малою вагою та габаритами, великим струмопроходженням, малою енергоємністю. Масфільтр не критичний до розкиду іонів пучка за енергіями. Це дозволяє експлуатувати його з найбільш простими джерелами іонів, що значно полегшує умови експлуатації іонно-променевих установок.

Питання для самоперевірки

1. Призначення джерел іонів.
2. Розкажіть про основні процеси у твердому тілі при електронному та іонному бомбардуванні.
3. Перерахуйте основні технологічні операції, виконувані електронно-іонними методами.
4. Поясніть будову та основні вузли електронно-іонних установок.
5. Чим пояснюється використання плазми в якості ефективного джерела заряджених частинок?
6. У чому виявляється вплив магнітного поля на дуговий розряд з розжарювальним катодом? Як це використовується при конструюванні іонних джерел?
7. Особливості розряду з осциляцією електронів в магнітному полі. Розкажіть будову газомagnetронного джерела іонів.
8. Які особливості розряду Пенінга з холодним катодом? Приклади використання його в іонних джерелах.
9. Яка будова плазмових джерел тугоплавких елементів? Як у них відбувається утворення газоподібного середовища?
10. Поясніть будову, конструктивні особливості та принцип роботи іонних джерел з утворенням парів робочої речовини нагрівом.
11. Поясніть будову та принцип роботи іонних джерел з нагріванням робочої речовини електронним бомбардуванням.
12. Розкажіть будову та принцип роботи іонних джерел з утворенням робочої речовини під дією розряду, на прикладі газомagnetрона.
13. Призначення і структура електронно-оптичних систем (ЕОС).
14. У чому особливості ЕОС для отримання іонних пучків?
15. Які використовуються способи вилучення іонів та первинного формування іонного пучка.
16. Які системи застосовують для фокусування пучків?

17. Як здійснюється відхилення пучків?

18. Призначення та принцип дії масфільтрів іонних установок: магнітні та динамічні квадрупольні масфільтри.

4. ПЛАЗМОВІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОНІВ

4.1. ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОННИХ ДЖЕРЕЛ

До плазмових джерел електронів (ПДЕЛ) будемо відносити пристрої, в яких для отримання електронних пучків використовується плазма (рис. 4.1). В багатьох випадках відбір електронів проводиться з межі плазми, утвореної в локалізованому об'ємі (рис. 4.1, а – г, е). Відхід електронів з плазми поповнюється електронною емісією з катода та іонізацією газу. Плазма, з якої можна витягувати електрони, створюється за допомогою газового розряду (рис. 4.1, а – г), при вибусі провідників, наприклад, катодних мікровиступів (рис 4.1. е), в результаті поверхневої іонізації атомів, наприклад цезію на вольфрамі, та іншими способами. Існують ПДЕЛ в яких пучок утворюється з електронів, емітованих холодним катодом під дією бомбардування його іонами плазми (рис. 4.1, д). Крім того, високоенергетичні пучки створюються в плазмі при протіканні в ній струму за рахунок виникнення нестійкостей визначеного типу [8, 9].

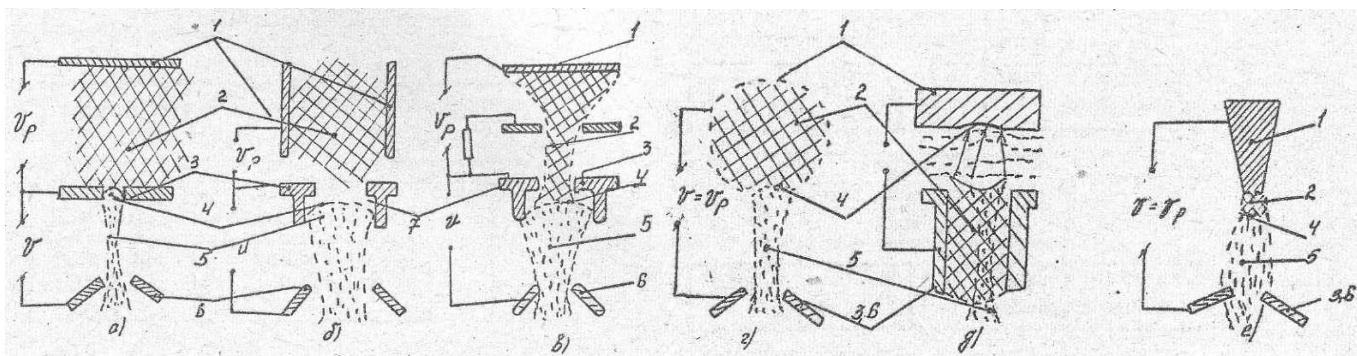


Рис. 4.1. Схеми плазмових джерел електронів (ПДЕЛ)

1 – катод, 2 – плазма, 3 – анод розрядної камери, 4 – емітуюча межа плазми, 5 – пучок, 6 – видобуваючий (прискорюючий) електрод, 7 – експандер.

Плазма в ПДЕЛ слугує:

1. Для збудження електронної емісії з катода;
2. Для захисту розташованого певним чином в розрядній камері катода, від бомбардування високоенергетичними іонами, що поступають з прискорюючого проміжку;

3. Для захисту катода від запилення парами оброблюваного матеріалу (рис. 4.1, б, в);

4. Для переходу від густини емісійного струму катода до щільності пучка: збільшення щільності струму пучка може бути досягнуте за рахунок стиснення стовпа розряду і розмноження електронів в результаті іонізації газу, а зменшення щільності струму та збільшення емітуючої поверхні – за рахунок розширення плазми а експандері;

5. Для усунення залежності електронно-оптичних властивостей ПДЕЛ від ступеня ерозії катода (рис. 4.1, а – г, е);

6. Для здійснення емітуючою поверхнею плазмового фокусування пучка (рис. 4.1, б – г);

7. Для отримання поряд з електронним пучком іонного потоку при зміні полярності прискорюючої напруги (рис. 4.1, а – г).

Всі параметри джерел заряджених частинок можна умовно розділити на фізико-технічні, які описують їх особливості та дозволяють порівнювати між собою та експлуатаційні, які дозволяють визначати можливості застосування джерел для тієї чи іншої мети.

Фізико-технічні параметри

1. Ефективність вилучення заряджених частинок за струмом розряду (α) оцінюється як

$$\alpha = \frac{I_n}{I_p},$$

де I_n – струм сформованого пучка; I_p – розрядний струм. Величина α показує як використовується плазма, утворена в джерелі.

2. Енергетична ефективність (економічність) – є величина струму пучка, одержувана на одиницю витрат потужності

$$H = \frac{I_n}{P_p},$$

де P_p – розрядна потужність; V_p – падіння напруги на розряді. У розрядну потужність в загальному випадку слід включати потужність, що витрачається на розжарення катода, підтримання магнітного поля і т. п. Економічність ПДІ можна підвищувати шляхом зниження напруги горіння розряду, застосовуючи ефективні катода та постійні магніти.

3. Газова економічність або витрата плазмоутворюючої речовини (η_g) характеризує ступінь використання плазмоутворюючої речовини, що надходить в генератор та необхідну швидкість відкачування в області формування пучка

$$\eta_g = \frac{v_n}{v_a},$$

де v_n – потік заряджених частинок; v_a – потік атомів, що витрачаються. Якщо робоча речовина знаходиться при нормальних умовах в газоподібному стані, то газова економічність прийме вигляд

$$\eta_g = \frac{0,8I_n}{q_a} \cdot 100\%,$$

де I_n – струм пучка, мА; q_a – витрата плазмоутворюючого газу при нормальних умовах, см³/г.

4. Якісний склад пучка характеризується масовим спектром. Так для іонних джерел наявність паразитних або супутніх іонів того чи іншого виду оцінюють зазвичай у вигляді відношення струму супутніх іонів I_c до струму основних іонів I_i

$$\beta = \frac{I_c}{I_i},$$

5. Зарядовий склад іонного пучка залежить від процесів в генераторі плазми, та на кількісному рівні може бути оцінений за зарядовим спектром іонів, одержуваних з джерела.

6. Енергетичний розкид іонів в пучку оцінюється за розкидом швидкостей іонів в поздовжньому та поперечному напрямках по відношенню до напрямку виходу.

7. Спектр коливань, присутній у пучку, що витягується.

Експлуатаційні характеристики

1. Загальний струм сфокусованого пучка (I_n).
2. Розміри та форма поперечного перерізу пучка.
3. Розподіл щільності струму за перерізом пучка.
4. Прискорююча напруга, яка визначає енергію частинок, що виходять та потужність пучка.
5. Ступінь модуляції пучка

$$M = \frac{2\Delta I_n}{I_{n0}} \cdot 100\% ,$$

де ΔI_n – розмах коливань; I_{n0} – постійна складова.

6. Емітанс є двовимірною проекцією фазового об'єму, який займає сформований пучок. Емітанс визначається за наступним виразом:

$$E = \frac{1}{\pi} \int dx dx' ,$$

де $x' = dx/dz = P_x/P_z$, x та y – поперечне та поздовжнє зміщення частинки пучка; P_x та P_z – відповідні імпульси.

7. Термін служби або термін безперервної роботи.

Крім зазначених вище характеристик іноді до уваги береться потужність джерел електричного живлення та необхідність у підводі охолоджуючої рідини (у більшості випадків води або масла).

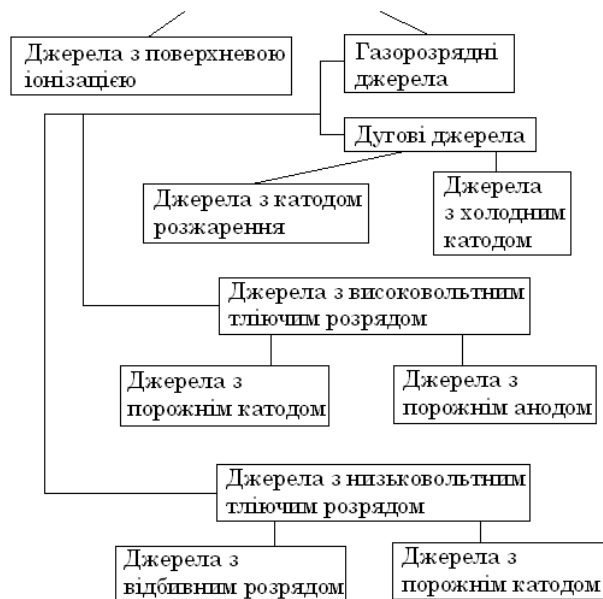
У ПДЕЛ плазма виконує декілька з перерахованих операції, хоча одна з них, як правило, є основною. Так, наприклад, в джерелах з високовольтним тліючим розрядом (рис. 4.1, д) плазма є в основному стимулятором електронної емісії з холодного катода.

Проведемо класифікацію ПДЕЛ за способом отримання плазми. ПДЕЛ можна розділити на дві великі групи: джерела зі стаціонарною плазмою та джерела з нестаціонарною плазмою. На рис. 4.2 наведена класифікація ПДЕЛ зі стаціонарною плазмою.

До групи газорозрядних джерел входять джерела на основі відбору електронів з поверхні локалізованої плазми, джерела, що використовують іонно-електронну

емісію, джерела з променевою формою розряду. В джерелах на основі відбору електронів з поверхні локалізованої в обмеженому обсязі плазми: в залежності від величини струму можуть використовуватися різні види електричного розряду. В джерелах з променевою формою розряду та на основі іонно-електронної емісії використовується головним чином високовольтний тліючий розряд.

1. Джерела зі стаціонарною плазмою.



2. Джерела з нестаціонарною плазмою.

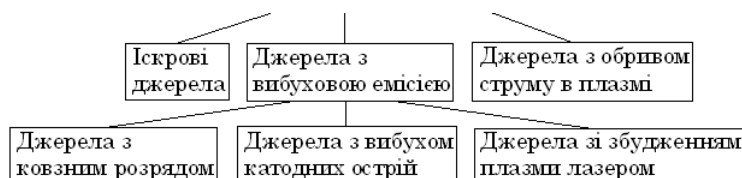


Рис. 4.2. Класифікація плазмових джерел електронів (ПДЕЛ)

4.2. ДЖЕРЕЛА НА ОСНОВІ ВІДБОРУ ЕЛЕКТРОНІВ З ПЛАЗМИ

За принципом відбору електронів і формування пучка, джерела з відбором електронів з поверхні локалізованої в обмеженому об'ємі плазми близько примикають до пристроїв з розжарений катодом. У тому та іншому випадках є поверхні, емітуючі електрони та пристрої для формування та прискорення електронів. В залежності від величини вихідного струму та режиму витягування в плазмових джерелах для отримання плазми можуть використовуватися різні види

газового розряду: іскровий, дуговий з холодним катодом, дуговий з розжареним катодом, розряд з осциляцією електронів в магнітному полі та поверхневий розряд.

Джерела на основі розряду з осциляцією електронів в магнітному полі

Розряд з осциляцією електронів в магнітному полі є однією з перспективних форм розряду, придатних для формування плазми в електронних джерелах. Завдяки високій щільності плазми при низьких тисках в розряді з холодними катодами відкривається можливість створення економічних ефективних джерел з високовольтним витяганням електронів. В даний час в електронних джерелах використовуються модифікований пенінговський розряд. Він збуджується в системі, що складається з двох катодів, розташованих один навпроти іншого та циліндричного анода, розташованого між ними. Магнітне поле спрямоване паралельно осі симетрії анода. Це поле ускладнює радіальний дрейф електронів, що емітуються катодами до анода. Внаслідок цього довжина шляху їх руху в камері (поздовжнє коливання та циклотронне обертання) значно перевищує міжелектродні відстані. Це призводить до підвищення ступеня іонізації газу в розрядній камері.

Залежно від сукупності параметрів таких як тиск газу, напруженість магнітного поля розрізняють кілька типів пенінговського (відбивного) розрядів.

Високовольтний розряд низького тиску існує при тисках $P < 10^{-4}$ мм рт. ст. При цьому довжина вільного пробігу електронів набагато більше розмірів електродної системи. Напруга горіння розряду при цьому становить зазвичай $V_p = 10^3$ В, а щільність катодного струму $j \leq 10^{-3}$ А/см².

Магнітне поле не дозволяє електронам в пенінгівській системі відразу потрапити на анод. Вони здійснюють поздовжні коливання між катодами і одночасно беруть участь в циклотронному обертанні і азимутному дрейфі в схрещених полях. Радіальне положення центру циклотронної орбіти електронів змінюється лише в результаті їх зіткнень з атомами.

Перехідна форма розряду. Зі збільшенням тиску газу за деяких умов виникає перехідна від високовольтного режиму низького тиску до низьковольтного режиму високого тиску форма розряду. У цій формі зберігається ще прианодна електронна

оболонка з нерівномірним прианодним розподілом заряду, але вже існує характерний для тліючого розряду прикатодний іонний шар. Прикладена напруга ділиться між цими двома областями, розділеними плазмою. Напруга горіння залишається високою, а струм досягає декількох десятків міліампер.

Тліючий відбивний розряд. Підвищення тиску газу в розряді призводить звичайно при $P \geq 10^{-3}$ мм рт. ст. до переходу в низьковольтну форму. При токах $I_p \leq 1$ А та відсутності катодних плям розряд багато в чому подібний аномальному тліючому розряду з позитивним стовпом у магнітному полі. Основна частина напруги зосереджена в катодному падінні потенціалу. Іонний струм на катоді складає 50 – 80 %. При струмах в кілька сот міліампер і більше напруга горіння досягає 10^3 В. Це обмежує застосування такого розряду в ПДЕЛ через низьку енергетичну ефективність, жорстких вимог до системи охолодження розрядної камери, інтенсивної ерозії катодів за рахунок бомбардування їх високоенергетичними іонами.

При роботі ПДЕЛ зазвичай підтримується постійним надходження газу в розрядну камеру, а не тиск. Встановлено, що зниження тиску в камері викликається в основному відкачуючою дією розряду. Це призводить до різкого збільшення напруги. Відкачування відбувається, головним чином, за рахунок адсорбції нейтральних атомів розпорошеним матеріалом катодів.

Дуговий відбивний розряд. З ростом струму тліючий розряд може переходити в дугу з катодною плямою. Використовувати плазму такого розряду для отримання електронних пучків, неможливо, через нестабільність локальних параметрів плазми, яка утворюється при переміщенні катодних плям, що виникають змінно на обох катодах. Однак, цей розряд може використовуватися для ініціювання інших розрядів.

Ефект полого катода в відбивному розряді.

Відбивний розряд з холодними катодами може існувати у формі, подібній до форми тліючого розряду, при більш низькому тиску, ніж потрібно для горіння звичайного тліючого розряду. Це дозволяє використовувати відбивний розряд в ПДЕЛ. Однак, в стаціонарному відбивному розряді отримання щільної плазми

ускладнене відкачуючою дією розряду. Це призводить до того, що при малих потоках газу розряд стає або нестійким або високовольтним. Швидкість відкачування та інтенсивність ерозії можна знизити, використовуючи пенінговську електродну систему з порожнистим катодом. Ця система була вперше застосована в іонному джерелі.

Збудження ефекту порожнього катода. Розглянемо вольтамперну характеристику відбивного розряду з порожнистим катодом та розподіл щільності струму за довжиною катодної порожнини (рис. 4.3). Тут для порівняння представлена вольтамперна характеристика при відсутності катодної порожнини. При малих розрядних струмах в межах ділянки АБ в системі з порожнистим катодом збуджується звичайний відбивний розряд, через те, що ця катодна порожнина на цей розряд не впливає. Ефект порожнистого катода при малих струмах відсутній тому, що в цих умовах електричне поле та заряджені частинки не проникають з пенінговської системи в катодну порожнину. Проникненню плазми та електронів перешкоджає катодне падіння потенціалу V_K перед апертурою катодної порожнини. Попадання іонів в катодну порожнину ускладнюється їх розсіюванням перед апертурою внаслідок опуклої поверхні межі темного катодного простору.

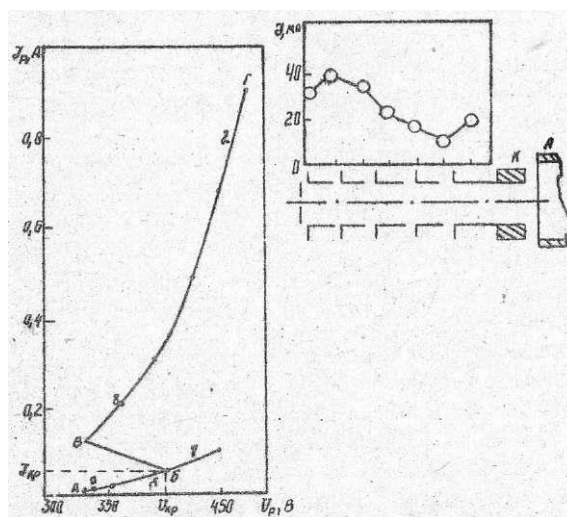


Рис. 4.3. Вольтамперні характеристики відбивного розряду: 1 – з плоскими електродами; 2 – з порожнистим катодом.

Зі збільшенням струму протяжність l_K до області катодного падіння потенціалу зменшується. При деяких критичних параметрах відбивного розряду, що

відповідають точці Б (рис. 4.3), темний катодний простір в області апертури порожнини зменшується. Причому настільки, що відбувається розрив іонної оболонки перед апертурою порожнини і плазма проникає в катодну порожнину. Умова проникнення плазми: $l_k \leq r_n$, де r_n – радіус катодної порожнини. Проникаюча в катодну порожнину плазма є джерелом іонів і ультрафіолетового випромінювання. Ця плазма має потенціал близький до анодного. Тому вона забезпечує радіальне електричне поле в цій порожнині та катодні процеси поширюються на її стінки. Розподіл поля в катодній порожнині створює умови для радіальних коливань електронів, які підвищують ступінь іонізації газу в порожнині. При цьому відбувається перебудова розряду (ділянка БВ), яка супроводжується збільшенням струму, зниженням напруги горіння, появою струму в катодній порожнині та плазмового шнура в проміжку навпроти її апертури, що яскраво світиться. Виникає ефект порожнього катода. Йому відповідає ділянка ВГ вольтамперної характеристики. Струм порожнього катода в цьому режимі перевищує в чотири рази струм плоского катода.

Основним механізмом електронної емісії порожнини є фотоефект. В той час, як в звичайному відбивному розряді основну роль грають іонно-електронна емісія та вихід електронів через окисні покриття при осіданні на них іонів.

4.3. ЕЛЕКТРОННІ ДЖЕРЕЛА НА ОСНОВІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО РОЗРЯДУ В РОЗРІДЖЕНОМУ ГАЗІ

ПДЕЛ на основі високовольтного тліючого розряду призначені в основному для отримання електронних пучків. У таких ПДЕЛ електрони самотійного розряду прискорюються та формуються у пучок в області просторового заряду того ж розряду (рис. 4.1, г та д).

Загальні властивості та класифікація високовольтних тліючих розрядів

Розрядний проміжок в таких системах має осьове або радіальне обмеження. При низьких тисках ($10^{-3} \div 10^{-1}$ мм рт. ст.) це призводить до того, що іонний струм на катоді недостатній для підтримки самостійного розряду. Умова підтримки розряду $\gamma Q_0 p d = 1$ збігається з умовою запалювання розряду і відповідає лівій гілці кривої Пашена. При цьому маємо високі напруги горіння. Завдяки цьому збільшується коефіцієнт іонно-електронної емісії γ , що сприяє підтримці розряду. Напруга горіння розряду при цьому може складати $10^4 \div 10^5$ В. Основна частина напруги зосереджується у відносно вузькій області. Електрони, що потрапляють в область з таким полем, переходять від дрейфового руху в режим вільного прискорення та набувають енергії, практично рівної пройденій різниці потенціалів. У результаті середня довжина їх вільного пробігу зростає. Такий газовий розряд можна використовувати для отримання високоенергетичних електронних потоків.

Область сильного поля примикає у високовольтному розряді до поверхні, що емітує електрони. Залежно від того, чи є емітером поверхня катода або плазмова межа, розрізняють розряд з плазмовим анодом або розряд з плазмовим катодом. Плазма у високовольтному розряді утворюється зазвичай в тій області розряду, куди ускладнене проникнення сильного поля. Тому перший і другий типи розрядів зазвичай реалізуються використанням порожнистих електродів зручної геометрії. У зв'язку з цим високовольтний тліючий розряд з плазмовим анодом часто називають високовольтним розрядом з порожнистим анодом, а високовольтний розряд з плазмовим катодом – високовольтним розрядом з порожнистим катодом. На рис. 4.4. наведені деякі електродні системи. Там також нанесені розподіл потенціалу та траєкторії електронів.

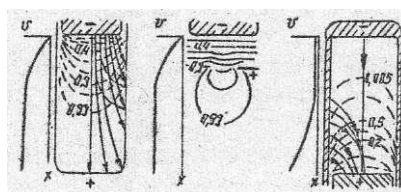


Рис. 4.4. Електродні системи з неоднорідним електричним полем: а – з порожнистим анодом; б – з плоским анодом, що мають отвір; в – з порожнистим катодом.

Високовольтний тліючий розряд підтримується за рахунок іонно-електронної емісії катода, а також електронної емісії під дією бомбардування катода швидкими нейтралами, утвореними внаслідок перезарядки іонів. На рис. 4.5. наведені вольт-амперні характеристики систем з порожніми катодом та анодом, а також плоскопаралельної системи. При малих значеннях струму напруга горіння не залежить від нього. У цьому випадку розряд можна віднести до найпростішого тліючого розряду, коли немає спотворення електричного поля об'ємним зарядом. При значних токах об'ємний заряд підсилює неоднорідність поля, що викликає перехід до щільного тліючого розряду з позитивною вольт-амперною характеристикою

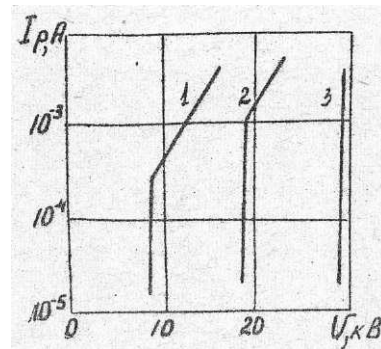


Рис. 4.5. Вольт-амперні характеристики високовольтного тліючого розряду: 1 – з порожнистим анодом, 2 – з порожнистим катодом, 3 – з плоскими електродами.

Високовольтний розряд з порожнистим анодом

В системі з порожнистим анодом (рис. 4.4. а) область сильного поля знаходиться поблизу катода. Аналогічний "розподіл" виникає в приосьовій області плоскопаралельного проміжку з отвором у аноді (рис. 4.4. б). Електрони, що емітуються катодом, набувають в прикатодному просторі значну швидкість уздовж осі системи, в результаті чого траєкторії більшості з них прямолінійні, незважаючи на дефокубуючу дію анодної апертури.

При низьких тисках умови запалювання і підтримки розряду виконуються лише вздовж довгих електронних шляхів. Це співпадає з найбільшою відстанню між електродами. Це призводить до локалізації розряду в приосьовій області та утворенню пучка, що слабо розходиться.

В системі з порожнистим анодом із зростанням струму (крива 1 рис. 4.5) поле внаслідок збільшення просторового заряду ще сильніше стягується до катода. В результаті прикатодна область з пласким полем розширюється в радіальному напрямку та зменшується провисання поля в анодну область. Вплив просторового заряду на електронний пучок визначається сукупною дією цих двох факторів: зменшення дефокусуючої дії провисання поля і розширенням пучка за рахунок збільшення робочої області катода. При цьому в анодній області утворюється плазма, яка є емітером іонів. Ці іони підтримують розряд і визначають струм та робочу поверхню катода. Струм електронного пучка в загальному випадку визначається співвідношенням:

$$I = BV^m P^n,$$

де B , m та n – постійні, залежні від матеріалу катода, типу газу та геометрії.

ПДЕЛ на основі високовольтного розряду з анодною плазмою

Отже, принцип дії електронних гармат на основі високовольтного розряду з порожнистим анодом полягає в тому, що пучок формується з електронів, емітованих холодним катодом в результаті іонного бомбардування. Геометрія анода вибирається такою, щоб плазма формувалась у просторі за апертурою анода. Це досягається тим, що тиск та довжина розрядного проміжку підбираються відповідними лівій гілці кривої Пашена. При цьому електрони, емітовані катодом, рухаються до анода як у вакуумі. У формуванні плазми за апертурою анода (рис. 4.6) беруть участь і вторинні електрони, вибиті зі стінок порожнистого анода, і позитивні іони, які витягуються з плазми та утворюють позитивний просторовий заряд.

Формування пучка в гарматах з іонно-електронної емісією та високовольтним розрядом з порожнистим анодом можливе двома способами. Перший ґрунтується на основі електростатичного фокусування емітованих катодом електронів та здійснюється в системі спеціальної геометрії (рис. 4.6). Дефокусуючий вплив анодної апертури на прискорений пучок невеликий, тому кросовер пучка збігається з центром кривизни поверхні катода. Сутність другого способу полягає у

фокусуванні пучка іонів, що бомбардують холодний катод, електричним полем порожнистого анода та діафрагми.

Цей принцип реалізовано в конструкції електронної гармати з порожнистим анодом, схематично показаної на рис. 4.7. При фокусуванні іонів на катоді утворюється як би точкове джерело електронів, які, прискорюючись в шарі позитивного заряду, рухаються поблизу оптичної осі електростатичної лінзи. Основним недоліком такого способу є швидке руйнування робочої поверхні катода та формування кратера, що впливає на електронно-оптичні властивості системи.

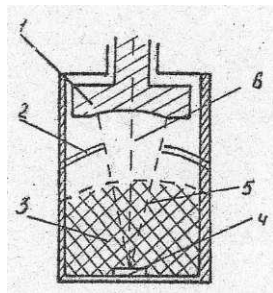


Рис. 4.6. Джерело з іонно-електронною емісією з холодним катодом: 1 – катод, 2 – анод, 3 – плазма, 4 – мішень, 5 – електронний пучок, 6 – іонний шар.

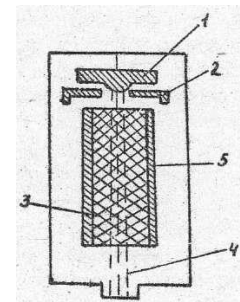


Рис. 4.7. Електронна гармата з порожнистим анодом: 1 – катод, 2 – діафрагма, 3 – порожнистий анод, 4 – електронний пучок, 5 – плазма.

Одна з відмінних особливостей високовольтного тліючого розряду можливість отримання з його допомогою електронних пучків різної конфігурації, у тому числі кільцевих і стрічкових. Для цього на основі елементарної електродної системи (рис. 4.5, б) можна сформувати більш складні системи. Електричне поле в цих системах підтримує розряд в області, що визначає форму поперечного перерізу та збіжності пучка. Схеми електродних систем для формування стрічкового та кільцевого пучків показані на рис. 4.8.

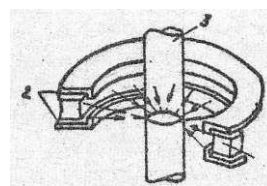
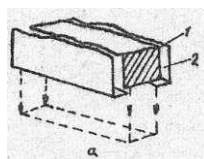


Рис. 4.8. Схеми електродних систем: а – для формування стрічкового пучка, б – для формування кільцевого пучка. 1 – катод, 2 – анод, 3 – мішень.

Електронні джерела високовольтного розряду з порожнистим катодом

Високовольтний розряд з порожнистим катодом реалізується в системі, що показана на рис. 4.1, в. У ній більшість іонів рухаються по силових лініях поля, потрапляють на бічну поверхню катода і вибивають електрони. Емітовані електрони утворюють поблизу анода пучок, що сходиться. Високовольтний розряд з електронним пучком існує при тих же тисках, що і тліючий розряд (10^{-3} мм рт.ст.). Високовольтний тліючий розряд також використовується в ПДЕЛ. Характерною особливістю розряду з порожнистим катодом є підвищена концентрація електронів в області негативного світіння. Ця область, як правило, знаходиться в катодній області і обумовлена інтенсивною фотоемісією з катода під дією ультрафіолетового випромінювання та м'якого рентгенівського випромінювання, що генерується в самому розряді, а також осциляцією електронів в катодній порожнині.

У розрядному проміжку з порожнистим катодом спеціальної конструкції може бути збуджений розряд з електронним пучком, для якого характерна наявність чітко окресленого електронного пучка. Для збудження такого розряду зазвичай використовуються порожнисті перфоровані або сітчасті катоди циліндричної або сферичної форми. На рис. 4.9. показаний принцип пристрою для генерації електронного пучка в системі з порожнистим катодом. При подачі на перфорований порожнистий катод негативної напруги відносно заземленого анода запалюється тліючий високовольтний розряд. Іони з плазми розряду, яка перебуває поза катодної порожнини, прискорюються в темному катодному просторі і надходять на катод. Частина іонів, що проникають через отвори в порожнину катода, викликає вторинну емісію.

Ці процеси разом з іонізацією і фотоемісією сприяють заповненню катодної порожнини плазмою негативного світіння розряду. Оскільки потенціал плазми в порожнині позитивний по відношенню до її поверхні, тільки невелика частина електронів виходить з порожнини через отвір перфорації, а основна їх частка виходить через емітуючий отвір у вигляді пучка. Експериментально встановлено, що цей отвір має бути в 3 рази більше, ніж отвір перфорації. В даний час за

допомогою подібних систем генеруються електронні пучки потужністю до 10 кВт, при струмі пучка 2 А. Напруга горіння розряду 5 – 25 кВ.

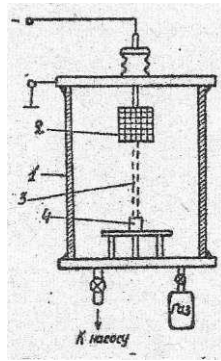


Рис. 4.9. Електронний нагрівач з перфорованим порожнистим катодом. 1 – корпус-анод, 2 – катод, 3 – електронний пучок, 4 – мішень, 5 – фокусуюче кільце, 6 – апертура катода, 7 – перфорована стінка катода.

На основі екранованого порожнистого катода розроблена ПДЕЛ з напругою горіння розряду до 170 кВ. Загальний струм при цьому становить 0 – 12 мА, струм променя 14 – 5 мА відповідно.

ПДЕЛ можуть працювати на різних газах. Однак від виду газу залежить робочий діапазон тисків та характеристики джерела. У інертних газах діапазон тисків більш вузький, ніж у повітря.

4.4. ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСТОСУВАННЯ ПДЕЛ

Конструктивні, експлуатаційні характеристики ПДЕЛ роблять перспективними їх застосування в електронно-променевій технології, що включає плавку, зварювання, розмірну обробку, відпал, нанесення покриттів, інші технологічні операції.

Найбільше застосування ПДЕЛ отримали в електронно-променевому зварюванні, де застосовуються пучки з середньою потужністю 0,1 – 30 кВт з питомою потужністю $10^5 \div 10^6$ Вт/см².

Відносно мала чутливість ПДЕЛ до важких вакуумних умов та іонного бомбардування зумовлюють перспективність їх застосування в технологічних процесах, що вимагають безперервних електронних пучків великої потужності

(> 10 кВт) з відносно невеликою щільністю потужності на об'єкті нагріву ($10^2 \div 10^4$ Вт/см²). До таких процесів відноситься електронно-променеве зварювання, плавка, нанесення покриттів випаровуванням, відпал, знегажування.

Найбільш потужними ПДЕЛ неперервної дії в даний час є дуоплазмотрони з розжаним катодом. Незважаючи на присутність термокатодів, дуоплазмотрони мають більший термін служби, ніж звичайні гармати такої ж потужності, оскільки катод в дуоплазмотроні захищений від високоенергетичних іонів та парів арматурою розрядної камери та наповнюючим її газом.

ПДЕЛ на основі високовольтного розряду з порожнистим анодом, які генерують широкі пучки, знаходять застосування для термічної обробки металевих стрічок, спікання лакових покриттів на листовому металі, спікання порошків, пайки та інших цілей. Описуються застосування ПДЕЛ, що забезпечують сфокусовані пучки, для вирощування кристалів, нанесення керамічних та металевих покриттів, плавки. Створені технологічні ПДЕЛ з порожнистим анодом і порожнистим катодом з потужністю безперервного пучка до 50 кВт та гармата з двадцятьма окремими катодами для отримання широкого пучка потужністю до 1 МВт.

ПДЕЛ застосовуються також в електронних прискорювачах, через те, що такі прискорювачі почали застосовуватися широко в науці та техніці, наприклад, для неруйнівного контролю виробів за допомогою гальмівного випромінювання та електронних пучків, променевої терапії, біологічної стерилізації сільгосппродукції, радіаційної хімії і т. д. ПДЕЛ застосовуються в прискорювачах як джерела заряджених частинок замість традиційного термокатада, що значно підвищує термін служби.

У прискорювачах використовуються ПДЕЛ різного типу: на основі відбивного розряду з холодним катодом, іскрові джерела з вибуховою емісією електрона і т. і.

Одним з застосувань ПДЕЛ, що інтенсивно розвивається є використання їх для збудження об'ємних газових розрядів високого тиску в електроіонізаційних лазерах, які є перспективними з точки зору отримання великих енергій випромінювання. Основними особливостями електронних джерел, які застосовуються для цих цілей є велика площа перетину пучка ($10 \div 10^{-4}$ см²) з

однорідним розподілом щільності струму по перетину та вивід пучка з вакууму чи газу низького тиску в газ високого тиску.

Крім того, ПДЕЛ знаходять широке застосування а експериментальній техніці.

Питання для самоперевірки

1. Призначення плазмових джерел електронів ПДЕЛ.
2. Чим пояснюється використання плазми в якості ефективного джерела електронів?
3. Який принцип відбору електронів з плазми.?
4. Особливості розряду з осциляцією електронів в магнітному полі.
5. У чому сутність ефекту порожнистого катоду у відбивному розряді?
6. Особливості контрагованого дугового розряду та використання його в ПДЕЛ.
7. Розкажіть про властивості високовольтного тліючого розряду.
8. Принцип роботи ПДЕЛ на основі високовольтного розряду з анодною плазмою,
9. Принцип будови ПДЕЛ з порожнистим катодом.

5. ПЛАЗМОВІ ПРИСКОРЮВАЧІ

Плазмові прискорювачі – це системи, в яких відбувається утворення іонізованої пари або газу в різних типах електричних розрядів у вакуумі та їх подальше прискорення під дією газодинамічних або електромагнітних сил при збереженні квазінейтральності плазми. Завдяки квазінейтральності плазмового струменя щільність потоку маси в таких прискорювачах може бути великою. Необмеженою може бути і концентрація енергії електромагнітного поля в одиниці об'єму. Тому в плазмових прискорювачах можуть бути отримані досить високі швидкості робочої речовини (до 10^5 м/с). Ці важливі властивості плазмових прискорювачів розширюють область застосування їх при вирішенні різних завдань плазмової технології [10].

5.1. КЛАСИФІКАЦІЯ ПРИСКОРЮВАЧІВ ПЛАЗМИ

Магнітогідродинамічні (МГД) генератори за своїм принципом дії можуть працювати не тільки в режимі генерації енергії, але і в своєрідному руховому режимі, будучи споживачами електроенергії. При цьому плазма буде прискорюватися та викидатися за межі МГД-каналу. Крім прискорювачів, що використовують магнітогідродинамічний ефект, існують прискорювачі, які використовують і інші фізичні ефекти.

Розглянемо класифікацію прискорювачів за принципом дії. За сучасною класифікацією прискорювачі плазми підрозділяються на електромагнітні та теплові. Крім цих типів можна так само виділити прискорювачі плазми, засновані на її діаманітних властивостях.

Теплові прискорювачі плазми не дозволяють, як правило, отримувати великі швидкості плазмових струменів. Проте вони знаходять дуже широке застосування в сучасній техніці в якості генераторів плазми (плазмотронів).

Електромагнітні прискорювачі за характером підведення енергії діляться на три класи: радіаційні, індукційні та електродні.

Класифікація електромагнітних прискорювачів показана на рис. 5.1.

Електромагнітні		
Електродні	Радіаційні	Індукційні
1. Із зовнішнім магнітним полем	1. Хвильовідні	
2. З власними магнітним полем	2. Лазерні	

Рис. 5.1. Класифікація електромагнітних прискорювачів плазми.

Всі прискорювачі плазми, окрім різних методів підведення енергії, можуть класифікуватися також за методами отримання плазми, призначеної для прискорення.

Перед тим, як розглядати основні типи прискорювачів, розглянемо які існують механізми прискорення плазми.

5.2. МЕХАНІЗМИ ПРИСКОРЕННЯ ПЛАЗМИ

При повній іонізації плазми вона складається з двох компонентів – електронів та іонів. Рух кожного компонента істотно відрізняється один від одного. Так електрони, навіть при кімнатній температурі ($T \sim 0,03$ eV), мають швидкість 10^5 м/с, тому проблема їх прискорення не виникає. В той же час іони мають значно більшу масу, мають низькі швидкості. Як наслідок, прискорення плазми зводиться до прискорення іонів при збереженні квазінейтральності ($n_e \approx n_i \approx n$).

Які ж можливі механізми прискорення іонного компонента плазми?

Запишемо рівняння руху окремого іона.

$$M_i \frac{d\mathbf{V}_i}{dt} = e\mathbf{E} + \mathbf{F}_{ii} + \mathbf{F}_{ei} + e\mathbf{V}_i \times \mathbf{B}, \quad (5.1)$$

де \mathbf{F}_{ii} і \mathbf{F}_{ei} – відповідно сили тертя, що діють на іон з боку інших іонів та електронів. З рівняння (5.1) випливає, що змінити модуль швидкості іона можуть лише перші три сили в правій частині рівняння. Сила Лоренца $e\mathbf{V}_i \times \mathbf{B}$ може лише змінити напрямок вектора швидкості. З урахуванням квазінейтральності $n_e \approx n_i \approx n$ та

$$\mathbf{F}_{ei} = \frac{m_e(\mathbf{V}_e - \mathbf{V}_i)}{\tau_{ei}}; \quad \mathbf{j} = ne(\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_e); \quad \sigma_0 = \frac{e^2 n_e \tau_{ei}}{m_e},$$

де τ_{ei} – час між зіткненнями електрона з іоном; σ_0 – ізотропна провідність плазми. Тоді рівняння (5.1) може бути записано в гідродинамічній формі

$$M_i \frac{d\mathbf{V}_i}{dt} = e\mathbf{E} + \left(-\frac{\nabla \mathbf{P}_i}{n} + \mathbf{F}_{vi} \right) - \frac{e\mathbf{j}}{\sigma_0} + e\mathbf{V}_i \times \mathbf{B}. \quad (5.2)$$

З (5.1) та (5.2) випливає, що сила \mathbf{F}_{ii} еквівалентна дії градієнта іонного тиску та силі в'язкості. Сила \mathbf{F}_{ei} – омічному тертю.

Таким чином іони можуть бути прискорені

1. Електричним полем – силою $e\mathbf{E}$.
2. Силою тертя з боку електронів – «електронний вітер».

$$\mathbf{F}_{ei} = -\frac{e\mathbf{j}}{\sigma_0}.$$

3. Силою тертя з боку інших іонів – газокінетичний розгін

$$\mathbf{F}_{ii} = \left(-\frac{\nabla \mathbf{P}_i}{n} + \mathbf{F}_{vi} \right).$$

Умови реалізації цих способів прискорення іонів, вочевидь, визначаються динамікою електронного компонента плазми. Бо саме електрони сприймають енергію електромагнітного поля та передають її іонам.

За аналогією з рівняннями (5.1) та (5.2) запишемо рівняння руху елементарного електрона

$$m_e \frac{d\mathbf{V}_e}{dt} = e\mathbf{E} + \mathbf{F}_{ee} + \mathbf{F}_{ei} + e\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}, \quad (5.3)$$

$$m_e \frac{d\mathbf{V}_e}{dt} = \left(-\frac{\nabla \mathbf{P}_e}{n} + \mathbf{F}_{ve} \right) + \frac{e\mathbf{j}}{\sigma_0} - e\mathbf{E} - e\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}. \quad (5.4)$$

Сила $e\mathbf{E} - \frac{e\mathbf{j}}{\sigma_0}$ – визначає прискорення іонів електронів магнітним полем та входить як у рівняння руху для іонів (5.2), так і в рівняння руху для електронів (5.4).

Нехтуємо інерційним членом для електронів та силами в'язкості. Тоді з (5.4) отримаємо

$$e \left(\mathbf{E} - \frac{\mathbf{j}}{\sigma_0} \right) \approx e\mathbf{V}_e \times \mathbf{B} - \frac{\nabla \mathbf{P}_e}{n}. \quad (5.5)$$

Згідно рівнянню (5.5) існують два способи створення прискорюючої сили для іонів.

1. Спосіб Лоренца

$$e\left(\mathbf{E} - \frac{\mathbf{j}}{\sigma_0}\right) \approx e\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}, \quad (5.6)$$

тобто для прискорення іонів необхідне магнітне поле.

У випадки щільної плазми $\frac{E}{j/\sigma_0} \rightarrow 0$ дія сили ампера проявляється в існуванні «електронного вітру».

$$\frac{\mathbf{j}}{\sigma_0} \approx \mathbf{V}_e \times \mathbf{B}.$$

У випадку більш розрідженої плазми $\frac{j/\sigma_0}{E} \rightarrow 0$ маємо

$$\mathbf{E} \approx \mathbf{V}_e \times \mathbf{B},$$

тобто електричне поле та сила, що прискорює іони, можуть існувати при наявності замагніченості та дрейфу електронів.

2. "Больцманівський" спосіб.

$$e\left(\mathbf{E} - \frac{\mathbf{j}}{\sigma_0}\right) \approx -\frac{\nabla \mathbf{P}_e}{n}. \quad (5.7)$$

Реалізація цього способу можлива при великому "відриві" температури електронів від температури іонів (неізотермічне прискорення плазми).

Складемо рівняння (5.2) та (5.4) без урахування сил в'язкості. Отримаємо звичайне рівняння руху елементарного об'єму плазми. Воно розкриває зв'язок розглянутого мікроскопічної трактування прискорення та макроскопічного трактування

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla \mathbf{P} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}. \quad (5.8)$$

З рівняння (5.7) видно, що прискорення способом Лоренца входить у доданок $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ (сила Ампера). Прискорення "больцманівським" способом – в доданок $\nabla \mathbf{P}$. Відповідно до розглянутих механізмів прискорення плазми розрізняють:

1. Електротермічні прискорювачі, в яких прискорення відбувається під дією градієнта газокінетичного тиску.

2. Електромагнітні прискорювачі, в яких прискорення відбувається під дією сили Ампера.

5.3. РІЗНОВИДИ ПРИСКОРЮВАЧІВ ПЛАЗМИ

Електродні прискорювачі плазми

Прискорювачі розглянутого типу частіше за все являють собою коаксіальну систему електродів, розділених ізолятором. Робоча речовина подається в прискорювач, як правило, в районі центрального електрода-катода. Застосовують термоемісійні катоди з вольфраму або сплавів на його основі, з високими емісійними властивостями. Аноди виконують з тугоплавких матеріалів, охолоджуваних. Ізолятори виконують з нітриду бору або окису алюмінію та винесені в зону розряду. Робочою речовиною в таких прискорювачах можуть бути різні гази або легкоплавкі метали, які тим або іншим способом випаровуються перед подачею в прискорювач. Струм, що пропускається через плазму, взаємодіє або з зовнішнім магнітним, або з власним магнітним полем. У результаті взаємодії струму з магнітним полем виникає електродинамічна сила – сила Ампера, яка і визначає процес прискорення плазми.

Тому, виходячи з механізму прискорення плазми прискорювачі ділять на:

- сильноточні плазмові прискорювачі (СПП);
- холівські плазмові прискорювачі (ХПП).

На рис. 5.2 зображені конфігурації електричних та магнітних полів для СПП і ХПП.

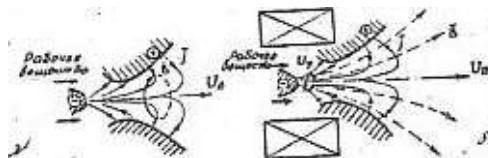


Рис. 5.2. Конфігурації електричних та магнітних полів в торцевих СПП і ХПП.

Прискорення робочої речовини в СПП здійснюється під дією сили Ампера. Ця сила виникає при взаємодії радіального струму розряду j_r з власним азимутальним магнітним полем B_ϕ . B_ϕ створюється струмом j_z , тобто

$$F = \int_V j_r B_\phi dV. \quad (5.9)$$

де V – об'єм прискорювача.

Вираз для сили F , діючої на плазму в СПП, після інтегрування набуде вигляду

$$F = 10^{-7} I^2 \left(\ln \frac{r_a}{r_k} + \frac{3}{4} \right) H,$$

де I – струм розряду; r_a та r_k – відповідно радіус аноду та катоду. Зазвичай в СПП $\ln \frac{r_a}{r_k} \approx 1,4$. Прискорювачі такого типу стають ефективними лише при досить великих значеннях струму розряду ($I > 10^3$ А). Діапазон робочих напруг в прискорювачах $10 \div 100$ В. Електрична потужність $> 10^5$ Вт. В СПП дія сили Ампера зводиться до захоплення іонів силами електронного тертя ("електронний вітер"). Швидкість плазми в СПП може бути оцінена із співвідношення $V = \frac{F}{m_M}$, де m_M – секундна витрата маси.

К. к. д. наближено дається виразом

$$\eta = \frac{m_M \frac{V^2}{2}}{m_M \frac{V^2}{2} + I(V_k^* + V_a^*) + \frac{m_M}{M_i} (eV_i + 3kT_e)}. \quad (5.10)$$

Танки чином, основні втрати енергії в СПП – це втрати в електродах $I(V_k^* + V_a^*)$ і так звані "заморожені" втрати (третій член у знаменнику). Вони являють собою теплову енергію та енергію, витрачену на іонізацію струменя плазми, що витікає.

Зазвичай в ПП $T_e \sim 1,5$ еВ; $V_a^* \sim 6 \div 8$ В; $V_k^* \sim 0,5 \div 1$ В; $N_{el} = 260$ кВт; $m_N = 0,025$ Г/с; $V = 10^5$ м/с; $\eta = 0,46$, робоча речовина – H_2 .

Розглянемо ХПП. Вони застосовуються в діапазоні порівняно невеликих струмів розряду ($I < 10^3$ А) і невисоких потужностей $N_{el} < 10^5$ Вт). В них суттєву роль

грає зовнішнє магнітне поле в зоні прискорення (рис. 5.2). Воно має аксіальну B_z і радіальну B_r складові, (зазвичай в ХПП $B_z \sim B_r \sim 0,1$ Т). Прискорення плазми здійснюється в основному силою, обумовленою взаємодією азимутального струму Хола j_ϕ з радіальною складовою зовнішнього магнітного поля B_r .

$$F = \int_V j_\phi B_r dV. \quad (5.11)$$

Азимутальний струм Хола виникає при наявності радіального електричного поля E_r , аксіального магнітного поля B_z та замагніченості електронів (в ХПП параметр Хола $\omega_e \tau_e$ становить 5 – 10).

Вираз (5.11) після інтегрування за об'ємом прискорювача прийме вигляд

$$F = k \overline{\omega_e \tau_e} \pi a IB. \quad (5.12)$$

де $\overline{\omega_e \tau_e}$ – середнє значення параметра Хола за об'ємом прискорювача, B – індукція магнітного поля на осі прискорювача, k – постійна величина.

З точки зору прискорення іонів дія сили Ампера зводиться до захоплення іонів самоузгодженим електричним полем, спрямованим на осі прискорювача. При цьому повинна виконуватися умова замагніченості електронів ($\omega_e \tau_e > 1$). Але в області катода діє інший механізм. Справа в тому, що в області катода концентрація робочої речовини достатньо велика (малі значення $\omega_e \tau_e$). Магнітне поле у катоді має лише Z -складову. Тому біля катода відбувається розкручування плазми до дрейфових швидкостей в зхрещених електричному та магнітних полях. Далі відбувається перетворення азимутальних швидкостей V_ϕ в основі швидкості V_z в розбіжному магнітному полі. Швидкість та к.к.д. ХПП визначається тими ж виразами (5.10). Як параметр ХПП можна навести такі дані: $N_{el} = 40$ кВт; $m_M = 5$ мГ/с, $V = 10^5$ м/с; $\eta = 0,55$, робоча речовина NH_3 .

Найпростішим прикладом прискорювача з зовнішнім магнітним полем є обернений режим роботи МГД-генератора. До електродів E_1 та E_2 (рис. 5.3) прикладається від зовнішнього джерела напруга, достатня для електричного пробоя робочої речовини. Розрядний струм, що протікає, взаємодіє з зовнішнім магнітним

полем з індукцією, напрямом якої вказаний на малюнку вектором \mathbf{B} . Прискорюється плазма, як і в розглянутих раніше пристроях амперівською силою.

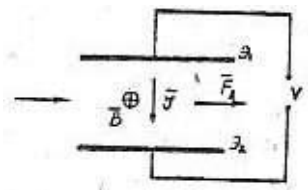


Рис. 5.3. Найпростіший прискорювач плазми із зовнішнім магнітним полем.

Прискорювачі плазми, які є оберненими МГД-генераторами, можуть працювати як в холівському, так і в фарадеївському режимах.

Дослідження коаксиальних прискорювачів показали, що значно підвищити швидкість плазмового згустку можна в тому випадку, якщо застосовувати імпульсний напуск газу. Обумовлюється це тим, що при неперервному заповненні об'єму прискорювача газоподібною речовиною плазмовий згусток при своєму прискоренні захоплює значну частину нейтрального газу і, штовхаючи його перед собою, відчуває значний опір при русі. Крім того, в коаксиальних прискорювачах помітно проявляється ерозія електродів. Тому перевагу віддають прискорювачам торцевого типу, які ми вже розглядали.

Розглянемо, як приклад, ще імпульсний плазмовий прискорювач на продуктах ерозії діелектрика.

Принципові схеми імпульсних ПП на продуктах ерозії діелектриків показані на рис. 5.4. Є електрод підпалу, на який подається енергія від конденсатора підпалу. Ця енергія становить 0,1 – 1 % від основної енергії. Між електродом підпалу та катодом прискорювача утворюється плазма. Вона інjektується в міжелектродний проміжок і таким чином збуджується основний розряд. В електротермічному прискорювачі розряд уздовж поверхні діелектрика розвивається в його парах. Плазма розряду інjektується через кільцевий анод. Розряд розвивається по осі прискорювача в напрямку витоку плазми. Тому прискорення плазми виникає під дією газодинамічних ефектів (градієнта тиску). У типовому прискорювачі при роботі на фторопласті з конденсаторною батареєю 100 мкФ та $V_0 = 1$ кВ був отриманий потік плазми густиною 10^{16} см⁻³, $t^\circ = 2,7$ еВ і швидкістю $1,6 \cdot 10^6$ м/с.

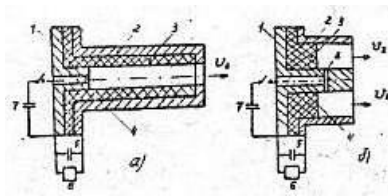


Рис. 5.4. Принципові схеми імпульсних ПП на продуктах ерозії діелектрика. а) електротермічний прискорювач; б) електромагнітний прискорювач; 1 – катод, 2 – анод, 3 – діелектрик, 4 – електрод підпалу, 5 – основний конденсатор, 6 – зарядний пристрій, 7 – конденсатор підпалу.

Зі збільшенням кута розкриття розрядної камери в такому прискорювачі зростає величина поздовжньої складової сили Ампера ($F = j_r B_\phi$). В граничному випадку отримаємо електромагнітний прискорювач.

5.4. ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСКОРЮВАЧІВ ПЛАЗМИ

Розробка прискорювачів плазми почалася 60-х роках минулого сторіччя.

В даний час вони вже широко використовуються в сучасній науці і техніці. Застосування універсальних плазмових пристроїв на основі різного типу розрядів з наступним прискоренням утвореної плазми під дією електромагнітних сил, дає великі перспективи для вирішення технологічних завдань. Плазмові прискорювачі ефективно використовуються для вакуумного очищення поверхонь, для нанесення покриттів на поверхні, для отримання тонких плівок, вирощування кристалів, а також для роботи в якості електрореактивних двигунів, для плазмового накачування оптичних квантових генераторів і т. д. Зупинимося коротко лише на використанні прискорювачів плазми в технологічних цілях.

Плазмові прискорювачі становлять великий інтерес для технологічних цілей тому, що вони забезпечують потоки речовини зі швидкостями від декількох сотень метрів до декількох сотень кілометрів на секунду. При цьому вони можуть забезпечувати подачу речовини до оброблюваної поверхні від декількох мікрограмів до сотень грамів на квадратний сантиметр за секунду. Дуже цінним є також та обставина, що в якості вихідних матеріалів для формування плазмових потоків придатні практично будь гази, метали та діелектрики.

Розглянемо деякі сторони застосування прискорювачів, як технологічного інструменту.

В даний час найбільш ефективне очищення поверхні за допомогою тліючого розряду та за рахунок іонного бомбардування. Для іонного бомбардування використовуються пучки іонів з щільністю струму до декількох десятків міліампер на квадратний сантиметр. Великі значення струмів важко отримати через вплив об'ємного заряду іонів. При роботі з прискорювачами плазми можливі значно більші щільності струму, так як плазма квазінейтральна. Крім того сучасні прискорювачі дозволяють в широких межах регулювати швидкість плазмового струменя. Ці обставини роблять застосування прискорювачів для очищення поверхонь вельми перспективними, через високу продуктивності процесу.

Ведуться також роботи із застосування потоків плазми для видалення тонких плівок металів, для іонного травлення твердих сплавів, напівпровідників і діелектриків.

У сучасній вакуумній технології основними методами отримання тонких плівок є випаровування і осадження речовин у вакуумі, а також катодне розпилення. Плівки, отримані методом катодного розпилення, мають більш високі адгезійні властивості, більш однорідні. Застосування прискорювачів плазми дозволяє значно збільшити швидкість нанесення плівок. Можливість регулювання швидкості плазми дозволяє впровадити матеріал, що осаджується в підкладку за заданим законом.

Узагальнюючи сказане, можна зробити висновок, що на основі прискорювачів плазми можливе створення універсального технологічного інструменту, здатного вирішувати цілий ряд завдань, таких як підготовка очищення поверхні з подальшим нанесенням на неї високоякісного плівкового покриття, або виконувати операцію іонного легування. Крім того, параметри прискорювачів плазми дозволяють проводити різання і зварювання різних матеріалів.

Питання для самоперевірки

1. Призначення і класифікація прискорювачів плазми.
2. Які Ви знаєте механізми прискорення плазми?
3. Поясніть механізм прискорення плазми в сильноточному прискорювачі та холівських прискорювачах.
4. Основні області застосування прискорювачів плазми.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Денбновецкий С.В., Барченко В.Т., Шмырева Л.Н. Физические основы генерации плазмы в ионно-плазменных устройствах технологического назначения. – К.: УМК ВО, 1989.
2. Яблонский Ф.М. Газоразрядные приборы для отображения информации. – М.: Энергия, 1979.
3. Рейзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987.
4. Самородов В.Г. Газоразрядная индикаторная панель с самосканированием и подготовка зажигания // Обзоры по электронной технике. – Сер. 4. – Вып. 4. – М., 1979.
5. Грановский В. Я. Электрический ток в газе. М.: Наука, 1971 г.
6. Габович М. Д. Физика и техника плазменных источников ионов и. М.: Атомиздат, 1972 г.
7. Габович М. Д. Плазменные источники ионов, К.: Наукова думка, 1964 г.
8. Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977, – 141 с.
9. Грановский В.Я. Электрический ток в газе. М.: Наука, 1971.
10. Минько Л.Я. Получение и исследование импульсных плазменных потоков. Минск: Наука и техника, 1970.